

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ANALÝZA VNÍMÁNÍ VÝŠEK V ZÁVISLOSTI NA SPEKTRU

ANALYSIS OF PITCH PERCEPTION DEPENDING ON THE SPECTRUM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Slávik

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Martin Slávik

**ID:** 214332

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Analýza vnímání výšek v závislosti na spektru

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Připravte a zrealizujte poslechový test na panelu nejméně 100 respondentů, jež budou vybráni z hudebníků, kteří se hudbou zabývají profesionálně nebo alespoň poloprofesionálně. V průzkumu se zaměřte na různě široké spektrum zvuku složených z harmonických, inharmonických ale i minoritních šumových složek. Vzorky můžete vybrat z reálných zvuků, ale nejméně polovinu vytvořte sám pomocí aditivní syntézy i dalších syntetických technik.

Na základě metody sémantického diferenciálu připravte dotazník, ve kterém respondenti určí míru sladění nebo rozladění hlavně čistých intervalů hraných různě harmonickými, inharmonickými i částečně ruchovými barvami. Použijte metodu škálování podle Dunna a Kinga.

Výstupem bude nalezení spojnic mezi psychoakustickým vnímáním jakosti spektra vůči výškové shodě či neshodě signálu. V závěru shrňte případné kategorie a poznatky důležité pro praxi hudebníků – při kterých barvách většina hudebníků lépe rozezná výškové rozdíly a při kterých už méně.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Melka, A.: Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-733-043-0
- [2] Štěpánek, J., Moravec, O.: Barva hudebního zvuku a její slovní popis, Akademie múzických umění v Praze, Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU, 2005. ISBN 80-7331-031-7.

**Termín zadání:** 1.2.2021

**Termín odevzdání:** 31.5.2021

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výzkumem vlivu jednotlivých harmonických složek na vjem výšky zvuku. Jako součást práce vznikl dotazník na webové stránce [www.analyzavysek.9e.cz](http://www.analyzavysek.9e.cz), kde jednotliví respondenti vyplňovali poslechový test celkem z 46 vzorků. Experiment vychází z metody sémantického diferenciálu. Jednotlivé vzorky jsou složeny ze sinusovky – tónu a zkoumaného zvuku, který respondent hodnotí na třech bipolárních škálách. Vzorky byly vymodelované pomocí aditivní syntézy, nebo byly použity upravené samplované zvuky nástrojů. Jednotlivé vzorky byly rozděleny do čtyř hlavních kategorií a následně pro přehlednost do různých podkategorií. Cílem bylo zjistit jaké části, kombinace, jednotlivé harmonické složky zvuku a tónu dokážou ovlivnit vjem výšky tónu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tón, harmonické složky, spektrum, psychoakustika, ladění, sémantický diferenciál, poslechový test, spektrogram, disonance, konsonance, alikvóty, inharmonicity, formantové oblasti

## ABSTRAKT

This thesis is dealing with the research of the influence of individual harmonic components on the perception of sound height. As a part of the work has been made an internet questionnaire on a web address [www.analyzavysek.9e.cz](http://www.analyzavysek.9e.cz), where individual respondents completed listening test compound of 46 samples. This experiment is based on semantic differential method. Individual samples are compound of sine wave – tone and examined sample, which respondents evaluates on three bipolar scales. The samples were either modelled by additive synthesis or modified sampled sounds of instruments. Individual samples were divided to four major groups and other minor groups for clarity. The purpose was to find which parts, combinations and harmonic components of sound and tone can affect perception of tone height.

## KEYWORDS

Tone, harmonic components, spectrum, psychoacoustic, tuning, semantic differential, listening test, spectrograph, dissonance, consonance, aliquots, inharmonic elements, formant area.

**Citace tištěné práce:**

SLÁVIK, Martin. *Analýza vnímání výšek v závislosti na spektru*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133494>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

**Citace elektronického zdroje:**

SLÁVIK, Martin. *Analýza vnímání výšek v závislosti na spektru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133494>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Martin Slávik

**VUT ID studenta:** 214332

**Typ práce:** Bakalářská práce

**Akademický rok:** 2020/21

**Téma závěrečné práce:** Analýza vnímání výšek v závislosti na spektru

*Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

Brno. ....

..... podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych upřímně poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu  
MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, cenné  
rady a pomoc při zpracovávání mé bakalářské práce.  
Dále děkuji všem ochotným lidem, za vyplnění mého poslechového testu.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PSYCHOAKUSTIKA</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>PERIODICKÉ FUNKCE A SPEKTRUM</b>	<b>3</b>
3.1	PERIODICKÉ FUNKCE	3
3.2	PRŮBĚH, SPEKTRUM A HARMONICKÁ ANALÝZA	3
3.3	FOURIEROVA ŘADA	4
<b>4</b>	<b>VNÍMÁNÍ ZVUKU</b>	<b>6</b>
4.1	SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ A POLE ČLOVĚKA	6
4.1.1	SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ ČLOVĚKA	6
4.1.2	SLUCHOVÉ POLE ČLOVĚKA	6
4.2	VÝŠKA ZVUKU	7
4.2.1	VNÍMÁNÍ VÝŠKY TÓNU	7
4.2.2	HARMONICKÁ ŘADA TÓNŮ	8
4.2.3	KOMBINAČNÍ TÓNY A RÁZY	9
4.3	BARVA ZVUKU	11
4.3.1	DEFINICE BARVY ZVUKU	11
4.3.2	TEORIE BARVY ZVUKU	12
<b>5</b>	<b>METODA SÉMANTICKÉHO DIFERENCIÁLU</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>PILOTNÍ PRŮZKUM</b>	<b>16</b>
6.1	INTERNETOVÝ DOTAZNÍK	16
6.2	RESPONDENTI	17
6.3	VÝSLEDEK PILOTNÍHO VÝZKUMU	18
<b>7</b>	<b>HLAVNÍ VÝZKUM</b>	<b>19</b>
7.1	INTERNETOVÝ DOTAZNÍK	19
7.2	PRŮBĚH VÝZKUMU	20
7.3	VOLBA VZORKŮ	20
7.3.1	SKUPINA VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY	21
7.3.2	SKUPINA VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU	22
7.3.3	SKUPINA VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT A UPRAVENÍMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI	24



7.3.4	SKUPINA VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM .....	25
7.4	RESPONDENTI.....	26
<b>8</b>	<b>SPEKTROGRAFY VZORKŮ .....</b>	<b>30</b>
8.1	SPEKTROGRAFY VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY .....	30
8.2	SPEKTROGRAFY VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU .....	31
8.3	SPEKTROGRAFY VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICITA UPRAVENÝMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI.....	32
8.4	SPEKTROGRAFY VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM .....	33
<b>9</b>	<b>VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....</b>	<b>35</b>
9.1	SKUPINA VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY .....	35
9.2	SKUPINA VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU .....	38
9.3	SKUPINA VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICITA UPRAVENÝMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI.....	42
9.4	SKUPINA VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM.....	45
9.5	ROZPORY PŘI VÝZKUMU.....	48
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>
	<b>LITERATURA A ZDROJE .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>54</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>55</b>

# Seznam obrázků

<b>Obrázek 1</b> – Základní tvary průběhů vlnění a jejich spektrum.....	4
<b>Obrázek 2</b> – Složení ucha.....	6
<b>Obrázek 3</b> – Oblast slyšení.....	7
<b>Obrázek 4</b> – Subjektivní vnímání změny výšky tónu na změně hlasitosti.....	7
<b>Obrázek 5</b> – Graf subjektivní výšky .....	8
<b>Obrázek 6</b> – Tónová posloupnost .....	9
<b>Obrázek 7</b> – Průběh rázů .....	10
<b>Obrázek 8</b> – Rozdílové tóny .....	10
<b>Obrázek 9</b> – Posilování a doplňování spektra .....	11
<b>Obrázek 10</b> – Screenshot pilotního internetového dotazníku.....	16
<b>Obrázek 11</b> – Věk respondentů pilotního dotazníku.....	17
<b>Obrázek 12</b> – Zaměření respondentů pilotního dotazníku v % .....	17
<b>Obrázek 13</b> – Screenshots, ukázka internetového dotazníku.....	19
<b>Obrázek 14</b> – Věkové skupiny respondentů v % .....	27
<b>Obrázek 15</b> – Hudební zaměření respondentů v %.....	27
<b>Obrázek 16</b> – Vzorky syntézy č.1 - se sudými harmonickými složkami .....	30
<b>Obrázek 17</b> – Vzorky syntézy č.2 - s lichými harmonickými složkami .....	30
<b>Obrázek 18</b> – Vzorky nástroje č.1 – Hoboje se sudými dominantními harmonickými složkami.....	30
<b>Obrázek 19</b> – Vzorky nástroje č.2 - Klarinetu s lichými dominantními harmonickými složkami.....	30
<b>Obrázek 20</b> – Vzorky syntézy č.3 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 3. harmonickou složkou .....	31
<b>Obrázek 21</b> – Vzorky syntézy č.4 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 5. harmonickou složkou .....	31
<b>Obrázek 22</b> – Vzorky syntézy č.5 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 6. harmonickou složkou .....	31
<b>Obrázek 23</b> – Vzorky syntézy č.6 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 7. harmonickou složkou .....	31

<b>Obrázek 24</b> – Vzorke nástroje č.3 - Zvon s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce .....	32
<b>Obrázek 25</b> – Vzorke nástroje č.4 - Zvon s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce .....	32
<b>Obrázek 26</b> – Vzorke nástroje č.5 - Akordeon s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce .....	32
<b>Obrázek 27</b> – Vzorke nástroje č.6 - Akordeon s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce .....	32
<b>Obrázek 28</b> – Vzorke nástroje č.7 - Agogo s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce .....	33
<b>Obrázek 29</b> – Vzorke nástroje č.7 - Agogo s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce .....	33
<b>Obrázek 30</b> – Vzorke syntézy č.7 - 6 harmonických složek - Nosné složky jsou rozladěné.....	33
<b>Obrázek 31</b> – Vzorke syntézy č.8 - 6 harmonických složek - Barvocitné složky jsou rozladěné.....	33
<b>Obrázek 32</b> – Vzorke syntézy č.9 - 4 harmonické složky s 2. a 4. harmonickou složkou rozladěnou.....	34
<b>Obrázek 33</b> – Vzorke syntézy č.10 - 4 harmonické složky s 2. harmonickou složkou rozladěnou.....	34
<b>Obrázek 34</b> – Vzorke syntézy č.11 - Ruchová barva se shluky u 1., 3. a 5 harmonické složky.....	34
<b>Obrázek 35</b> – Vzorke syntézy č.12 - Rozladěné 3 harmonické složky + šum .....	34
<b>Obrázek 36</b> – Grafy vyhodnocení 1. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga...	37
<b>Obrázek 37</b> – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů1. skupiny vzorků.....	37
<b>Obrázek 38</b> – Grafy vyhodnocení 2. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga.	41
<b>Obrázek 39</b> – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů2. skupiny vzorků.....	41
<b>Obrázek 40</b> – Grafy vyhodnocení 3. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga.	44
<b>Obrázek 41</b> – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů 3. skupiny vzorků.....	44
<b>Obrázek 42</b> – Grafy vyhodnocení 4. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga.	47
<b>Obrázek 43</b> – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů4. skupiny vzorků.....	47

# Seznam tabulek

<b>Tabulka 1</b> – Harmonická posloupnost.....	9
<b>Tabulka 2</b> – Vzorky se sudými a lichými harmonickými složkami .....	22
<b>Tabulka 3</b> – Vzorky vzniklé kombinací vyšších harmonických složek v prvním pásmu .....	23
<b>Tabulka 4</b> – Vzorky nástrojů s inharmonicitami a upravenými formantovými oblastmi .....	25
<b>Tabulka 5</b> – Vzorky s různou mírou inharmonicit, ruchovými složkami a šumem .....	26
<b>Tabulka 6</b> – Barevně seřazený seznam použitých vzorků dotazníku .....	28
<b>Tabulka 7</b> – Pořadí vzorků v dotazníku .....	29
<b>Tabulka 8</b> – <i>Hodnocení 1. skupiny vzorků v %</i> .....	36
<b>Tabulka 9</b> – <i>Odpovědi dotazníku 1. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem</i> .....	36
<b>Tabulka 10</b> – <i>Hodnocení 2. skupiny vzorků v %</i> .....	39
<b>Tabulka 11</b> – <i>Odpovědi dotazníku 2. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem</i> .....	39
<b>Tabulka 12</b> – <i>Hodnocení 3. skupiny vzorků v %</i> .....	42
<b>Tabulka 13</b> – <i>Odpovědi dotazníku 3. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem</i> .....	43
<b>Tabulka 14</b> – <i>Hodnocení 4. skupiny vzorků v %</i> .....	45
<b>Tabulka 15</b> – <i>Odpovědi dotazníku 4. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem</i> .....	46
<b>Tabulka 16</b> – Výčet všech neutrálních vzorků .....	48

## Seznam rovnic:

<b>Rovnice 1</b>	– Obecný vztah pro periodickou funkci .....	3
<b>Rovnice 2</b>	– obecný vztah pro harmonickou funkci .....	3
<b>Rovnice 3–14</b>	– Fourierova řada .....	4
(4)	$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx$ .....	4
(5)	$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx$ .....	4
(6)	$n = 1, 2, 3, 4, \dots$ .....	4
(7)	$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = f(x)$ .....	5
(8)	$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = f(x + 0) + f(x - 0)$ .....	5
(9)	$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(k\omega t) + b_n \sin(k\omega t)]$ .....	5
(10)	$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \, dt$ .....	5
(11)	$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos k\omega t \, dt$ .....	5
(12)	$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin k\omega t \, dt$ .....	5
(13)	$s(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega t) + \varphi_k$ .....	5
(14)	$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ a $\varphi_k = -\arctan \frac{b_k}{a_k}$ .....	5

# 1 ÚVOD

Nejen v muzikantském světě, jedna z nejčastějších otázek, která padá napříč všemi úrovněmi tohoto světa je, jestli hudební nástroj, těleso, či samotný zvuk „ladí“. V podstatě můžeme říct, že nezáleží na profilu osoby, která se otázkou zabývá. Jestli je to profesionální muzikant, dirigent, či studiový inženýr, nebo obyčejný posluchač. Věřím, že se s ní potkají, troufám si říct, úplně všichni. U profesionálních muzikantů je právě složka ladění velmi důležitá, neboť správně „sladěné“ tóny se používají k vyvolání různých emocí u posluchače a bez správně naladěných a sladěných nástrojů by to nebylo možné.

Celkový vjem výšky tónu je ovšem velmi individuální a každý člověk dokáže slyšet jednotlivé nuance trochu jinak. Někdo může vnímat i drobné změny, zatímco někdo další oproti tomu nedokáže slyšet ani větší rozdíly a tónové výchylky. Proto tahle práce bude pomyslnou křižovatkou mezi technickou, uměleckou a psychoakustickou stránkou – vytváření jednotlivých zvuků a sestrojení samotného experimentu a podrobné zkoumání a vyhodnocení výsledků experimentu.

V první části své práce budu především popisovat teoretické základy, které jsou nezbytné k pochopení mého měření a výsledků. Představím nezbytnou část k psychoakustice, matematické modely pro popis a skládání vlny a v neposlední řadě se pustím i do popisu některých částí, jako je skladba tónu, různé druhy ladění a z jakých složek se vůbec zvuk skládá.

V praktické části, v samotném experimentu, představím vytvořený dotazník a budu se věnovat samotnému vyhodnocení průzkumu. Přesněji se už budu zabývat popisem vybraných vzorků, co nám výsledky poslechového testu řekli, jaké z toho můžeme vyvést závěry a jak se dají získané informace použít do samotné praxe.

V této práci jsem se zaměřil na to, jakým způsobem člověk vnímá výšku tónu a kde jsou v tomto vjemu klíčové oblasti, které jsou pro správné cítění ladění zvuků k sobě kritické.

## 2 PSYCHOAKUSTIKA

Psychologická akustika, zkráceně psychoakustika je mezioborovou vědní disciplínou kombinující, jak už název napovídá, psychologii a akustiku. Psychoakustika vznikla jako disciplína proto, aby mohla zkoumat, jak jednotlivé zvukové podněty působí na chování a prožívání člověka.

Předchůdcem psychoakustiky je vědní disciplína psychofyzika, která jako odvětví psychologie vznikla v 19. století v Německu a dala historicky základ dnešní experimentální psychologii, tj. část psychologie, v níž je primární metodou získávání poznatků pokus, neboli experiment. Za zakladatele psychofyziky jsou považováni německý fyzik a filozof Gustav Theodor Fechner (1801-1860) a anatom a fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795-1878).

V psychoakustice se zaměříme na velmi široké spektrum otázek, sahající od zkoumání prahu slyšení osob přes posuzování zvukové kvality hudebních nástrojů k posuzování rušivých účinků hluku v kabině automobilu až třeba po studium vzniku agresivity u osob dlouhodobě vystaveným působení hluku. [1]

Dá se říct, že v těchto souvislostech hudební akustika zkoumá zákonitosti vjemu základních veličin tónu (hudebního zvuku) – jeho výšky, hlasitosti a zejména barvy, a to i pro případ souznění více tónů (zvuků). Zvuk totiž reflektuje až 60% informací z našeho okolí a slouží jako důležitý komunikační prostředek. [3]

Proto v psychoakustice jako vědní disciplíně používáme metody z oblasti psychologie k získání popisu sluchového vjemu jako odezvy na akustický podnět. Můžeme si přiblížit tři hlavní metody, které se nejčastěji využívají.

- Metoda observační:

U této metody se nezasahuje do průběhu jevu a procesy se zkoumají tak, jak probíhají. Nejčastěji se s touto metodou můžeme setkat při zkoumání nových, doposud neznámých dějů, obvykle za použití nové techniky a postupů, při výzkumu v oblasti fyziologie a neurověd.

- Metoda explorační

Tato metoda zkoumá jevy a procesy po jejich skončení na základě stop, které po nich zůstávají. Většinou se informace získávají otázkami formou dotazníků, poslechových testů a rozhovory u jednotlivých respondentů. Nejčastěji se můžeme s touto metodou setkat v oblasti psychologie a neurověd.

- Metoda experimentální

Při experimentu jsou předem stanovené hypotézy, které se aktivním zasahováním do průběhu procesů a jevů ověřují, či vyvrací. Důležitá je zde reakce respondenta na danou změnu, která samotná může být výsledkem experimentu. Tato metoda je nezbytná k potvrzování hypotéz a zjišťování kauzálních vztahů.

[4]

## 3 PERIODICKÉ FUNKCE A SPEKTRUM

### 3.1 PERIODICKÉ FUNKCE

Jako periodický pohyb, můžeme označit vše, co se pohybuje v pravidelném časovém intervalu a má stále se opakující průběh. Jako periodickou funkci, proto tedy můžeme označit právě takovou funkci, která má v pravidelném časovém intervalu stále se opakující průběh. Pokud se funkce neopakuje v pravidelném časovém intervalu, lze ji označit jako neperiodickou nebo kvaziperiodickou. Periodické funkce lze popsat matematickým vztahem takto:

$$f(x) = f(x + T)$$

**Rovnice 1** – Obecný vztah pro periodickou funkci

*Kde:  $f$  = funkce,  $T$  = perioda.*

Dále můžeme rozdělit periodické funkce jako harmonické. Neboli ty, které jsou v průmětu do dvourozměrného grafu spojitě a dají se vyjádřit jako :

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

**Rovnice 2** – obecný vztah pro harmonickou funkci

*Kde:  $A$  = amplituda,  $\omega$  = úhlový kmitočet,  $t$  = čas,  $\varphi$  = fázový posun.*

Jakoukoliv funkci, kterou nelze popsat rovnicí č.2, označujeme jako neharmonickou.

Funkce popsané vztahem v rovnici 1 a 2, se používají např. pro popis kmitání nebo vlnění, jelikož se jedná o harmonický, periodický pohyb.

Rozdíl mezi kmitáním a vlněním je, že kmitání popisuje výchylku amplitudy a vlnění je šíření kmitů v prostoru, tudíž se jedná už o tří rozměrný pohyb.

V této práci se budeme věnovat hlavně šíření a interakci zvukových vln, proto budeme blíže zkoumat hlavně vlnění.

### 3.2 PRŮBĚH, SPEKTRUM A HARMONICKÁ ANALÝZA

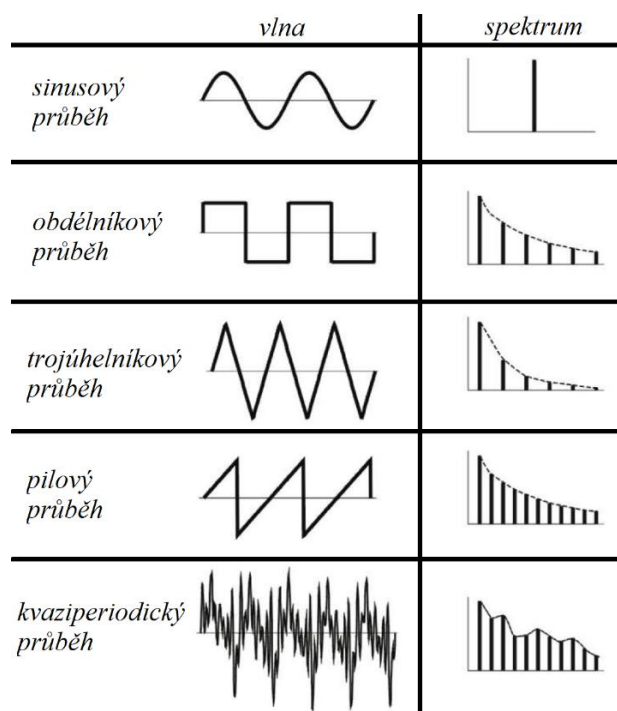
V běžném životě a zejména v hudbě s jednoduchými kmity nebo vlnami přijdeme do styku pouze výjimečně. Jednoduché harmonické kmity jsou zvukově ploché a bezbarvé. Proto je nutné pochopit skládání jednotlivých kmitavých pohybů v komplexní zvukový signál.

Pokud skládáme více kmitavých pohybů dohromady do zvukového signálu, tak se můžeme bavit o nějakém komplexním průběhu signálu. Komplexní kmitavý průběh vlny má kromě základní i další frekvenční složky. Jejich kmitočet je dán celočíselným násobkem právě základní frekvence vlny. Výčet vyšších harmonických složek se základní frekvencí  $f_1$  vypadá tedy takto:  $f_1, 2 f_1, 3 f_1, 4 f_1, 5 f_1, \dots$

Můžeme se tak bavit o vnitřním spektru neboli složení. Každý signál se tak podle vnitřního spektra dá rozložit (nebo složit) na jednotlivé dílčí harmonické složky. Pokud takto nějaké vlnění zkoumáme, provádíme harmonickou analýzu.



Když takto skládáme signál, můžeme se setkat s tím, že jeho křivka bude měnit tvar, jak budeme přidávat různé harmonické složky. Máme pět základních tvarů průběhů signálu – Sinus, Obdélník, Trojúhelník, Pílu a Kvaziperiodický průběh (viz obr. č. 1).



[14]

**Obrázek 1** – Základní tvary průběhů vlnění a jejich spektrum

### 3.3 FOURIEROVA ŘADA

Při provádění harmonické analýzy využíváme Fourierovu řadu. Je to matematický aparát, který slouží k rozkladu periodického signálu na dílčí harmonické složky. Vynalezen byl francouzským matematikem Jeanem Baptiste Joseph Fourierem a definice tohoto matematického aparátu zní:

*Nechť  $f(x)$  je periodická funkce s periodou  $2\pi$ , tj.  $f(x+2\pi) = f(x)$  pro všechna  $x$ , a necht'  $f(x)$  a  $f'(x)$  jsou po částech spojité funkce v intervalu  $-\pi ; \pi$ . Koeficienty  $a_n$  a  $b_n$  jsou dány vzorcem:*

[6]

**Rovnice 3-14** – Fourierova řada

$$(4) \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx$$

$$(5) \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx$$

$$(6) \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots,$$

Pak v každém bodě  $x$ , v němž  $f(x)$  je spojitá, platí: [6]

$$(7) \quad \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = f(x)$$

A v každém bodě, kde  $f(x)$  není spojitá, platí: [6]

$$(8) \quad \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = \frac{f(x+0) + f(x-0)}{2}$$

Tato formulace platí pro všechny signály, které mají v  $f(x+0)$  limitu z pravé strany  $f(x^+)$  a v  $f(x-0)$  limitu z levé strany  $f(x^-)$  a perioda nepřesahuje  $2\pi$ .

U reálných signálů se ovšem potkáme se signály, které mají větší periodu než  $2\pi$ , proto to musíme zohlednit a zvětšit tak kmitočet na  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}$ , kde  $T_1$  představuje periodu signálu  $s(t)$ . V takto upraveném tvaru dostaneme goniometrický tvar Fourierovi řady, který vypadá takto: [6]

$$(9) \quad s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)$$

Kde:  $k$  = pořadové číslo vyšší harmonické složky,  $\omega$  = úhlová frekvence,  $T$  = perioda,  $t$  = čas

Jednotlivé koeficienty Fourierovi řady se pomocí těchto vztahů vypočítají tímto způsobem: [6]

$$(10) \quad a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) dt$$

$$(11) \quad a_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \cos(k\omega_1 t) dt$$

$$(12) \quad b_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \sin(k\omega_1 t) dt$$

Tento základní tvar lze taktéž upravit. Pokud zohledníme v této rovnici modul a fázi vlny, tak získáme druhý – amplitudově-fázový tvar. Fourierovi řady, který vypadá takto: [6]

$$(13) \quad s(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega_1 t) + \varphi_k$$

Přitom platí že:

$$(14) \quad C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad a \quad \varphi_k = \frac{-b_k}{a_k}$$

Kde:  $C_k$  reprezentuje modul a  $\varphi_k$  fázi vlny [7]

## 4 VNÍMÁNÍ ZVUKU

### 4.1 SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ A POLE ČLOVĚKA

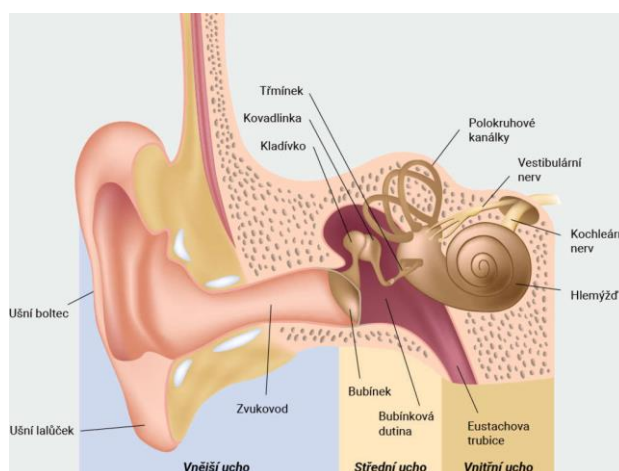
#### 4.1.1 SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ ČLOVĚKA

Sluchové pole člověka ovlivňuje jeho sluchový aparát. Sluchový aparát je složitý, komplexní systém složený z vnějšího ucha – boltec, zvukovod, středního ucha – bubínek, drobné kůstky (kladívko, kovádlínka, třmínek) a vnitřního ucha – hlemýžď, vláskové buňky, Reichnerova membrána vyústěná do Eustachovy trubice (viz obr. č. 2).

Boltec na vnějším uchu ovlivňuje směrovost poslechu. Utlumuje zvuky přicházející zezadu a usměrňuje tok zvukové vlny dál do ucha.

Střední ucho funguje jako pomyslný akusticko-elektrický převodník. Přicházející zvukové vlny rozkmitají přes bubínek celý složený mechanismus ucha, zajišťující přizpůsobení mezi okolním vzduchem a kapalinou uzavřenou v hlemýždi. Při konstantním působení tlaku se tento mechanický převodník dokáže přizpůsobit a funguje tak, jako pomyslná poslední ochrana před poškozením sluchu.

Ve vnitřním uchu se nachází vestibulární – rovnovážný systém a kochleární – sluchový systém. Hlemýžď je spirálovitá část vnitřního ucha ve které vibrace, přenesené ze středního ucha reagují na nervové buňky ucha, které pak pokračují k dalšímu zpracování do mozku. [4]



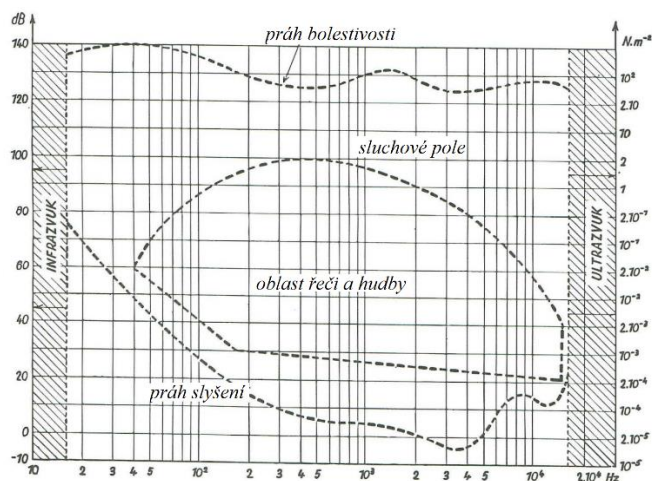
**Obrázek 2 – Složení ucha**

[13]

#### 4.1.2 SLUCHOVÉ POLE ČLOVĚKA

Díky rozdílnému a unikátnímu složení poslechového ústrojí u člověka dochází k tomu, že máme každý jinou prahovou citlivost slyšení. Citlivost souvisí s akustickým tlakem, působícím na sluchový aparát. Absolutní minimum a maximum slyšení se obecně přisuzuje od 16 Hz – 20 Hz až do 20 kHz. Ne však na všech frekvencích slyšíme hlasitost stejně. Nejcitlivější je ucho někde mezi 3 kHz – 5 kHz. Při působení více než 120 dB hlasitosti zvuku se nachází práh bolestivosti. Tehdy přestáváme rozeznávat konkrétní zvukové složky a začínáme vnímat bolest. Slyšení je oblast, infrazvuku a nad oblastí slyšitelnosti se nachází ultrazvuk (viz obr. č. 3). [8]

Ucho se rovněž používáním opotřebovává a s dospíváním a stárnutím se citlivost ucha snižuje. Pokud si ucho poškodíme, tak je to často nevratný proces, jelikož se sluchový orgán nedokáže sám regenerovat.



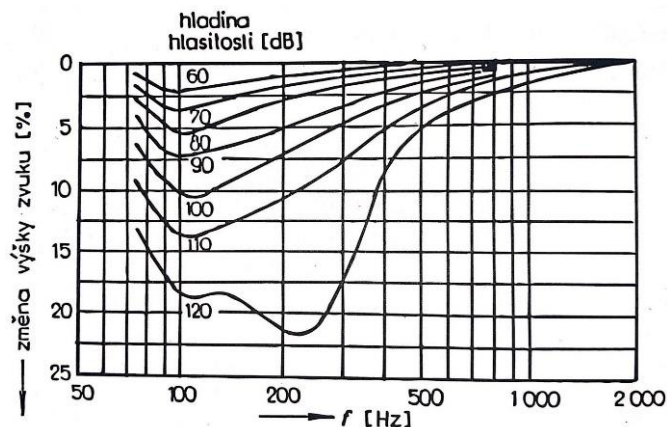
**Obrázek 3 – Oblast slyšení**

[8]

## 4.2 VÝŠKA ZVUKU

### 4.2.1 VNÍMÁNÍ VÝŠKY TÓNU

V předešlých kapitolách jsme už mírně zabrousili do tématu výšky zvuku. Výška zvuku je definována frekvencí a označujeme ji v Hertzích [Hz]. Velmi hluboké tóny mají nízkou frekvenci a vysoké tóny mají zpravidla frekvenci vysokou. Vjem výšky tónu, resp. zvuku ale není závislý čistě jen na frekvenci. Ovlivňuje jej i intenzita jakou na nás zvuk působí a doba, po kterou na nás působí. Pro představu, pokud necháme tón o výšce 150 Hz slabě znít nějaký časový úsek a budeme mu zesilovat intenzitu, tak nám s tím bude pocitově výška tónu klesat. Frekvence přitom ale bude pořád stejná. Obecně se dá říct, že změna hlasitosti o zhruba 40 dB vede k subjektivnímu snížení výšky tónu o 10% (viz obr. č. 4).



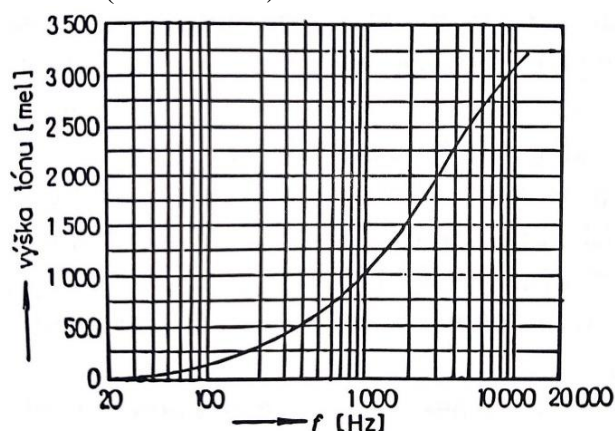
**Obrázek 4 – Subjektivní vnímání změny výšky tónu na změně hlasitosti**

[2]

Absolutní výškou označujeme místo zvuku, kde se výška tónu vnímaná posluchačem s normálním sluchem shoduje s frekvencí čistého tónu. Pro vyloučení závislosti na intenzitě se používá hladina 40 fónů a konkrétní výšku popisujeme fyzikálně frekvencí nebo uvedením odchylky ladění (nejčastěji v centech).

V místech, kde je výška tónu dána hudebním intervalem mezi tónem zkoumaným a základním se nazývá relativní výška. K popsání používáme jako základní jednotku 1 tón (jeho zlomky jsou např.: půltón, čtvrttón a násobky např.: sekunda, oktáva apod...)

Posledním označení výšky, se kterým se můžeme setkat, je subjektivní výška. Toto značení vzniklo nezávisle a jednotkou je 1 mel. Výšku 1000 melů má čistý tón o frekvenci 1000 Hz o hlasitosti 40 fónů. Subjektivní výška 500 melů je výška určená jako poloviční k 1000 melů (viz obr. č. 5). [2]



Obrázek 5 – Graf subjektivní výšky

[2]

#### 4.2.2 HARMONICKÁ ŘADA TÓNŮ

Harmonická řada tónů je posloupnost celočíselných násobků první frekvence tónu (fundamentu). Pokud se bavíme o tónu jakéhokoliv reálného zvuku, mimo čisté sinusovky, zaznívají nám právě tyto vyšší harmonické frekvence (viz kapitola 3.2.). Tyto frekvence mají konkrétní řazení a vzdálenost, ve které vznikají a dělí se na první, druhé a třetí pásmo. V prvním jsou tóny, které ucho dokáže jednotlivě identifikovat a rozeznat. Toto Pásmo je nejdůležitějším pro identifikování výšky a barvy tónu. Jednotlivé harmonické složky mají i svoji funkci při formování zvuku. Sudé násobky základní frekvence podporují konsonanci, celkové ladění a příjemný měkký tón, zatímco liché násobky podporují disonanci a ostrost tónu. Jednotlivé harmonické složky mají přínos a specifickou charakteristiku pro tvorbu zvuku následovně:

1. **Harmonická složka** je samostatně měkká a bezbarvá, ale nejdůležitější na celkovou nosnost tónu.
2. **Harmonická složka** zesiluje 1. harmonickou a přidává tónu mohutnost.
3. **Harmonická složka** přidává dutou, až tupou barvu tónu.
4. **Harmonická složka** podporuje jasnost tónu.
5. **Harmonická složka** přidává do tónu nazalitu.
6. **Harmonická složka** podporuje jas tónu.
7. **Harmonická složka** přidává bryslnost, drsnost tónu.
8. **Harmonická složka** podporuje jas tónu.

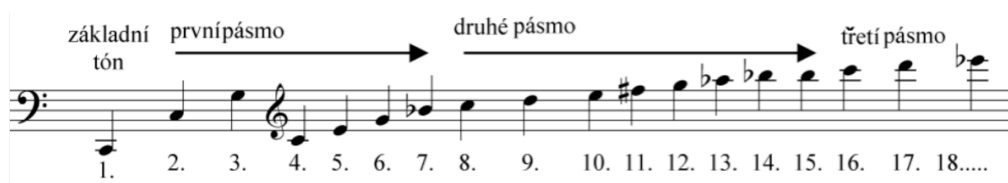
Ve druhém pásmu se nachází formantové oblasti a klustry (shluky), které jsou důležité hlavně jako barvodárné oblasti a dodávají tónu originalitu a osobitost. Ve třetím pásmu se nachází spojitá spektra a šumové oblasti tónu (viz obr. č. 6).

Pořadí tónů v harmonické řadě je:

základní frekvence (fundament) → čistá prima → čistá oktáva → čistá kvinta → čistá kvarta → velká tercie → malá tercie → malá tercie (zmenšená) → velká sekunda (zvětšená) → velká sekunda (velký celý tón) → velká sekunda (malý celý tón), atd. Vždy se přičítá základní frekvence, tím se posouvá výška tónu směrem nahoru ale zmenšuje se interval mezi jednotlivými tóny (viz tab. č. 1 a obr. č. 6).

Tón	C	c	g	c <sub>1</sub>	e <sub>1</sub>	g <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	e <sub>2</sub>	fis <sub>2</sub>	g <sub>2</sub>	as <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	h <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>
Pořadí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Frekvence	66	132	198	264	330	396	462	528	594	660	726	792	858	924	990	1056

**Tabulka 1 – Harmonická posloupnost**



[15]

**Obrázek 6 – Tónová posloupnost**

### 4.2.3 KOMBINAČNÍ TÓNY A RÁZY

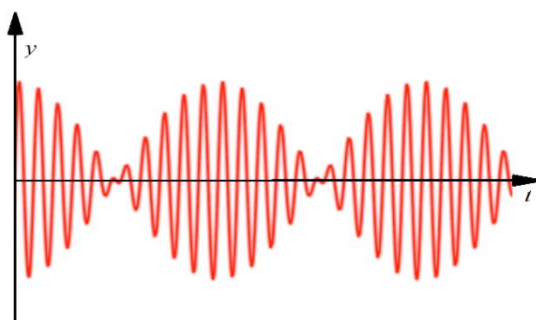
Pokud na nás působí souzvuk dvou a více tónů, které jsou si frekvenčně blízké, vznikají slyšitelné rázy (zázněje). Pokud rozdíl dvou frekvencí  $f_1 - f_2$  je menší než 20 Hz, slyšíme zvuk, jehož intenzita hlasitosti se zvětšuje a zmenšuje. Mluvíme tak o efektu příjemného tremola, pocitově o pumpování zvuku (viz obr. č. 7). V rámci subjektivního vnímání je tento jev omezen frekvencí 1 500 Hz. Při této frekvenci už zázněje lidské ucho přestává vnímat. S rázy přichází do styku muzikanti velmi často, neboť díky tomuto jevu např. ladí své hudební nástroje.

V uchu zároveň dokáže díky nelinearitě sluchového aparátu vznikat tzv. Tartiniho tón. Jedná se o imaginární tón, který vnímáme z pravidla při působení dvou a více souzvuků naráz. Tento kombinační tón však díky tomu, že vzniká až v uchu, nedokážeme přesně změřit.

Jako první ho dokázal německý hudební teoretik Georg Andreas Sorge a blíže se tomuto jevu věnoval a popsal ho v roce 1754 Giuseppe Tartini, po kterém se tyto tóny nazvaly [9]. Kombinační tóny mohou být diferenční (rozdílové), které vznikají při rozdílu frekvencí ( $f_1 - f_2$ ) nebo součtové (sumační), které vznikají součtem frekvencí



$(f_1 + f_2)$  větších než 20 Hz. Sumační tóny dokážeme vnímat z pravidla až při větších intenzitách.



**Obrázek 7 – Průběh rázů**

[16]



**Obrázek 8 – Rozdílové tóny**

[2]

Diferenční tón se nachází pod nižším tónem v menším intervalu, než je oktáva a mezi tóny při intervalu větším než je oktáva. V intervalu oktávy je diferenční tón roven nižšímu z tónů. Sumační tón vnímáme vždy nad vyšším z obou hraných tónů [5].

Pro představu v případě unisona je diferenční tón  $1 - 1 = 0$ . Polohu sumačního tónu představuje  $1 + 1 = 2$ , takže posiluje 2. harmonickou složku, oktávu. Pokud ovšem složíme tón v intervalu oktávy posiluje diferenční tón  $2 - 1 = 1 \rightarrow 1$ . harmonickou složku, fundament. U sumačního tónu  $2 + 1 = 3 \rightarrow 3$ . harmonickou složku a interval kvinty. Víme, že kvinta je po primě a oktávě třetím nejkonsonantnějším intervalem a dopomáhá tak konsonantnímu vjemu tohoto složeného tónu.

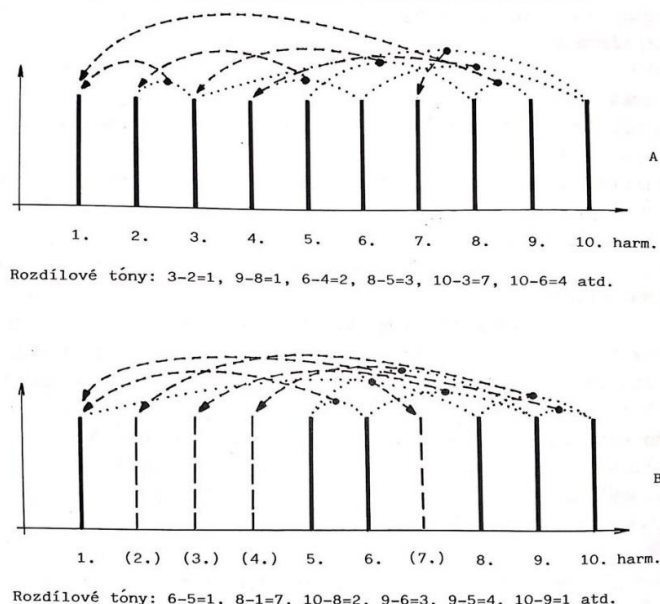
V případě tónu složeného z intervalu kvinty, 1. a 3. harmonické bude diferenční tón posilovat tento interval o chybějící druhou harmonickou  $3 - 1 = 2$  a sumační tón posilovat (teoreticky při vysoké intenzitě zvuku) o chybějící čtvrtou harmonickou  $3 + 1 = 4$ . Takže do zvuku tónu složeného z 1. a 3. harmonické se přidá 2. a 4. harmonická a zvuk tak bude působit barevněji, konsonantněji.

Zajímavý je interval kvinty a kvarty. U intervalu kvinty, tj. interval mezi 2. a 3. harmonickou složkou, a 3. a 4. harmonickou složkou. U intervalu kvinty nám diferenční tón posiluje základní složku, 1. harmonickou ( $3 - 2 = 1$ ), a v případě sumačního nám přidává chybějící 5. harmonickou ( $3 + 2 = 5$ ). Pátá harmonická složka je označována za barvocitnou, která přidává tónu nazálnost. Navíc se díky 5. harmonické přidává interval tercie. U intervalu kvarty máme diferenční tón opět 1, takže se posiluje základní tón ( $4 - 3 = 1$ ) a v případě sumačního tónu se přidává 7. harmonická složka ( $3 + 4 = 7$ ). 7. harmonická posiluje disonantní vjem a často tak je kvarta vnímána více jako disonantní interval. Takto by se dalo samozřejmě pokračovat.

V praxi mají nejvíce se to použije např. při stavbě varhan, kde se neinstalují nejdelší píšťaly pro subkontraoktávové frekvence, ale místo toho se použijí dvě píšťaly vyšších kontraoktávových frekvencí, které nám svým diferenčním tónem posílí vjem požadovaného nižšího, subkontraoktávového tónu. [10]

Naproti tomu směrem k vysokým frekvencím tento posilující mechanismus chybí a proto také případnou absenci vyšších harmonických složek ve spektru tónu nelze nijak subjektivně doplnit.

Subjektivní pohled na spektrum předpokládá a následně zohledňuje vzájemnou interakci složek spektra (viz obr. č. 9-A). Ta může být nabýt takové intenzity, že ve vjemu barvy nebo výšky subjektivně převažuje konkrétní interval, který ale objektivně ve spektru vnímaného tónu není reálně vůbec obsažen. U většiny hudebních nástrojů je sled harmonických složek nepřerušovaný, a tak subjektivní vjem stávající složky jen ověřuje a potvrzuje. Pokud je sled vyšších harmonických přerušovaný, subjektivní vjem místa chybějících složek dosazuje nové „virtuální“ harmonické složky (na obr. č. 9-B jsou vyznačeny čárkovaně), které informaci o barvě doplňují. [2]



**Obrázek 9 – Posilování a doplňování spektra**

[2]

## 4.3 BARVA ZVUKU

### 4.3.1 DEFINICE BARVY ZVUKU

Barva zvuku je mezinárodně definována, jako „vlastnost sluchového vnímání, která umožňuje posluchači usoudit, že dva neidentické zvuky mající stejnou hlasitost a stejnou výšku si nejsou podobné“ [1], [11]. U této definice se předpokládá, že podmínky, způsob, styl i prostorová prezentace a stejná subjektivní doba trvání dvou zvukových signálů je stejná [12]. Dodává se k této definici, že „barva zvuku závisí primárně na tvaru vlny, ale také na akustickém tlaku a krátkodobých vlastnostech zvuku“.



K těmto definicím lze mít pár výhrad, např. že definice nám přesně neříká, co to barva zvuku je, ale spíše nám jen říká, co to barva zvuku není. Není rovněž pravdou, že barvu zvuku dokážeme posuzovat pouze u zvuků, které mají stejnou hlasitost a výšku – např. dokážeme zcela jasně barevně rozeznat barvu basové kytary od bravy pikoly.

#### 4.3.2 TEORIE BARVY ZVUKU

Jak už je v této práci dříve zmíněno, u reálných zvuků vnímáme že mají specifická spektra a tím pádem mají i originální barvy. Německý fyzik G. S. Ohm v roce 1843 formuloval první psychoakustický zákon a označil tón sinusového průběhu za jediný možný nejjednodušší zvuk, který postrádá jakékoliv další vyšší harmonické složky.

Ačkoliv označujeme tento zvuk za bezbarvý a chudý, řada hudebních akustiků a psychologů přiznává vjem barvy zvuku i těmto jednoduchým tónům (sinusovému kmitání). O nalezení vztahu mezi jednoduchým spektrem tónu a barvou zvuku se snažil i H. von Helmholtz, který se v těchto snahách opírá o Fourierovy matematické operáty. Tyto vztahy jsou často označovány jako absolutní teorie barvy a jsou definovány takto:

[2]

1. Tóny, které mají sinusový charakter, např. u široce menzurovaných krytých varhanních píšťal, znějí tóny velmi měkce a příjemně bez jakékoliv drsnosti, ne silně a v hluboké poloze temně, tupě.
2. Komplexní tóny, které jsou tvořeny harmonickými složkami přiměřené intenzity, tak do 6. harmonické složky znějí plně, a „hudebně“. Ve srovnání s jednoduchými tóny jsou na barevnost bohatší a průraznější. Absence vyšších harmonických složek způsobuje, že znějí libozvučněji a měkce. Tyto tóny jsou typické pro klavír, lidský hlas, lesní roh hraný s nízkou dynamikou nebo otevřené varhanní píšťaly.
3. Komplexní tóny utvořené z pouze lichých harmonických složek znějí dutě a při větším počtu vyšších harmonických nasálně, např. klarinet, nebo úzce menzurované varhanní píšťaly.
4. Barvu lze označit za plnou tehdy, převažuje-li ve spektru 1. harmonická složka, v opačném případě bude tón znít prázdně, úzce. Tento rozdíl je typický mezi široce a úzce menzurovanými retnými varhanními píšťalami, mezi jazykovými píšťalami a tzv. regály, mezi cembalem a klavírem, apod.
5. Komplexní tóny s dominantními harmonickými složkami nad 6. nebo 7. harmonickou složkou je barva charakterizovaná jako ostrá a drsná. Souvisí to především s konkrétní sestavou těchto vyšších harmonických. Stupeň ostroty tónu se může velmi charakterově lišit, jako např. u plechových, či dřevěných dechových nástrojů, smyčcových nástrojů, či lidského hlasu apod. a zřetelně tak tyto nástroje odlišuje (spolu s dynamikou tónu).

U reálných zvuků mimo jednoduché tóny existují vyšší harmonická spektra (viz kapitola 4.2.2) a jejich barvu si dokážeme uchovávat dlouho poměrně přesně v paměti (dokonalejší na uchovávání podnětů je v rámci smyslů jen chuť, neboť si ji dokážeme k jakékoliv věci přesně přiřadit).

Ve 20. století ve snaze popřít Helmholtzovu absolutní teorii barvy při dlouholetém analyzování a studiu hudebních nástrojů, se zaměřením na formantové oblasti, které jako protiklad působí k Helmholtzově teorii, ve které se barva nástroje spojuje s konkrétní dominující tónovou složkou v celém tónovém rozsahu, Erich Schumann určil přiřadil dominující frekvenční oblasti v závislosti na výšce a dynamice. Tyto formantové zákony barvy zvuku zní: [2]

1. Zákon formantových oblastí

Barva zvuku resp. tónu hudebního nástroje nezávisí na výšce základní harmonické složky, ale je dána pevnou (frekvenční) polohou formantových oblastí, které se vyznačují silnějšími vyššími harmonickými tóny. Při stoupající výšce tónu a jeho stejné dynamice setrvává intenzivní maximum dané formantové oblasti na příslušném harmonickém tónu tak dlouho, dokud tento harmonický tón nedosáhne horní hranice oblasti. Potom se maximum přesouvá na nižší harmonický tón, který se v této formantové oblasti nalézá, nebo který do ní právě vstupuje.

2. Zákon formantových intervalů

Pro barvu zvuku, resp. tónu hudebního nástroje nejsou rozhodující jen frekvenční polohy jednotlivých formantových oblastí, ale také interval mezi těmito oblastmi. Rozhodující je především interval mezi nejsilnějšími harmonickými složkami (intenzivní maxima) těchto oblastí. Každý hudební nástroj má svoji vlastní charakteristickou velikost tohoto intervalu, což právě určuje jeho typickou barvu.

3. Zákon akustického posuvu

Při stoupající dynamice tónu se přesouvá intenzivní maximum v dané formantové oblasti na harmonické složky vyšších pořadových čísel. Složky v horní části oblasti jsou obecně silnější než složky ve spodní části.

4. Zákon akustického skoku

U tónu se dvěma formantovými oblastmi přeskakuje při velkém zesílení tónu intenzivní maximum nalézající se při slabé dynamice v nižší formantové oblasti na harmonický tón nalézající se ve vyšší oblasti

## 5 METODA SÉMANTICKÉHO DIFERENCIÁLU

Metoda sémantického diferenciálu vznikla v 50. letech 20. století, kdy byla vyvinuta americkým vědcem C. E. Osgoodem. Tuto metodu tzv. metodu polaritního profilu přivedl do evropské psychologie německý vědec P. R. Hofstätter. Nejdříve se používala k zjišťování a měření pojmů ale později našla uplatnění v sociologii, experimentální estetice, apod., kde slouží převážně ke zkoumání osobnosti. Tato metoda je odvozená z posuzování objektů na subjektivních posuzovacích škálách.

Sémantický diferenciál je často kritizován jako nespolehlivá výzkumná metoda hlavně kvůli výběru posuzovacích škál dotazníku. Argumenty mluvící v jeho neprospěch zdůrazňují, že vybrané páry adjektiv se nemusí nutně shodovat s těmi, které by zvolil posuzovatel při běžném opisu zvukového vjemu. Velkou nevýhodou téhle metody je, že různí posuzovatelé mohou stejné zvuky nazývat a opisovat odlišně. Problematická je tato metoda tedy i v její nejednoznačnosti, nepřesnosti a významovému překrývání některých slovních popisů či nemožnost nalézt k některým adjektivům správný antonymní výraz.

Německý psycholog A. Schick tuto kritiku odmítá a označuje ji za podceňování role řeči jako základního nosiče a zprostředkovatele významu. Přichází tedy s návodem, jak se těmto negativním vlivům vyhnout nebo je do značné míry oslabit. Výběr škál by měl podle něj zahrnovat tyto kroky: [1]

1. Shromáždění co největšího počtu adjektiv, popisujících charakteristické vlastnosti populace podnětů, z níž budou pocházet měřené podněty (např. adjektiva používaná k popisu barvy zvuku sólově hrajících houslí, adjektiva charakterizující hluk v kabinách osobních automobilů za jízdy, apod.).
2. Pokus o přiřazení antonymního výrazu ke každému ze shromážděných adjektiv.
3. Redukce počtu získaných antonymních párů adjektiv na experimentálně zvládnutelný počet „nejvhodnějších“ a vzájemně co nejméně závislých bipolárních adjektivních škál.
4. Experimentální posouzení vyšetřovaného vzorku objektů na souboru vybraných škál, podrobení posudků faktorové analýze a kontrola reprezentativnosti a citlivosti zvolených škál.
5. Závěrečná kontrola stability souboru vybraných škál.

Tuto metodu jsem ke svému výzkumu zvolil proto, jelikož nabízela nejlepší možnost, jak od respondentů získat velký objem dat a hodnotit více dílčích hledisek zároveň, při střední časové náročnosti. Vzhledem k obsáhlosti a samotné náročnosti poslechového testu, jsem právě časovou náročnost vnímal jako jednu z klíčových parametrů testu.

U této metody se po respondentovi, který dotazník vyplňuje (v mém případě se jedná o poslechový test) chce, aby vyšetřované objekty (v mém případě jednotlivé zvukové vzorky) posoudil na několika bipolárních škálách. Tyto škály jsou zpravidla sedmistupňové a mohou být číselné (1 – 7) nebo slovní (jednotlivé body jsou nahrazeny adjektivy jako např. „Mimořádně“, „Velmi“, „Trochu“, „Vůbec“, apod.).

Jednotlivé krajní body stupnice (v mém případě: 1,7) označují extrémy protikladných adjektiv. V mém případě:

- Zvuky vzájemně ladí / Zvuky jsou vzájemně extrémně rozladěné
- Barva zkoumaného zvuku je zcela konsonantní / Barva zkoumaného vzorku je zcela disonantní
- Vzorek byl lehce rozpoznatelný / Vzorek byl těžce rozpoznatelný

Správná volba bipolárních adjektiv přiřazených ke škále je kriticky důležitá, neboť respondentova volba musí odpovídat přesně jeho pocitu. Proto se věnovala velká pozornost zvoleným adjektivům a byla po pilotním průzkumu upravena do aktuální podoby.

## 6 PILOTNÍ PRŮZKUM

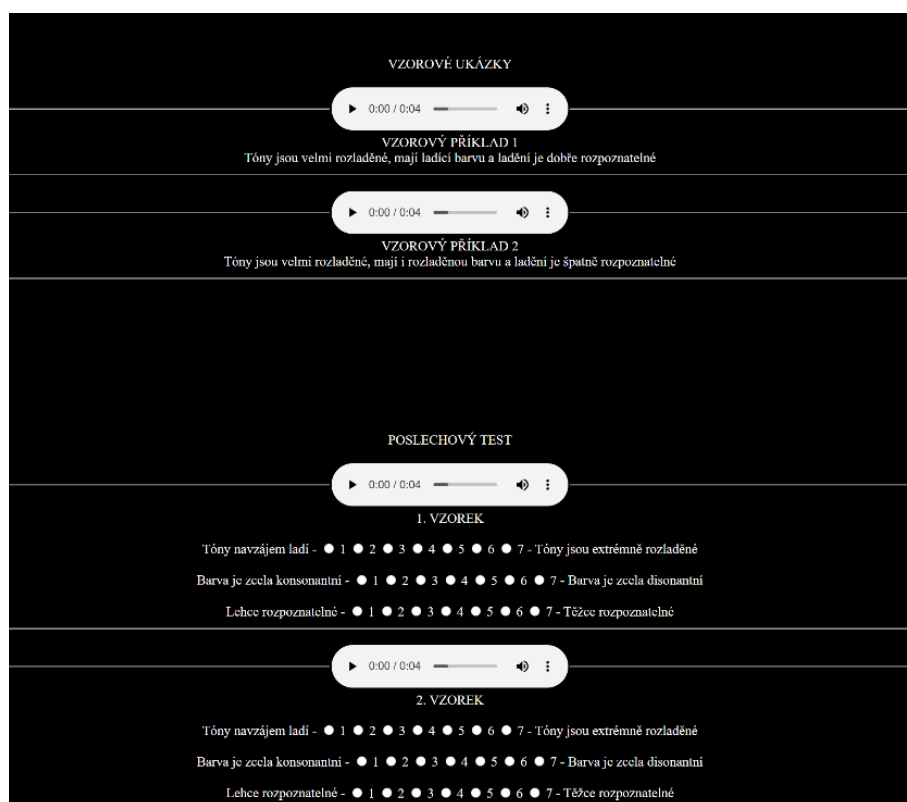
Pro pilotní poslechový test bylo hodnoceno 10 respondentů. U nich se především testovalo nastavení dotazníku a jeho funkčnost. Velká pozornost byla dána tomu, aby se zamezilo špatnému pochopení otázek, sporným vzorkům, přílišné obtížnosti, nebo časové náročnosti.

### 6.1 INTERNETOVÝ DOTAZNÍK

Pilotní dotazník byl vytvořen na internetové stránce, na které respondenti zadali vstupní informace nutné ke kategorizaci, následně byl dán návod k postupu a vzorové poslechové ukázky. Po projití těchto sekcí, se respondenti dostali k samotnému vypracování poslechového testu.

Jednotlivé vzorky byli za sebou řazeny 1 – 46, respondent mohl přeskakovat, vracet se, nebo si jednotlivé poslechové ukázky pouštět vícekrát. U každého zkoumaného vzorku byli 3 hodnocené škály body od 1 – 7 (viz obr. č. 10). Škály dotazníku byly vybrány takto:

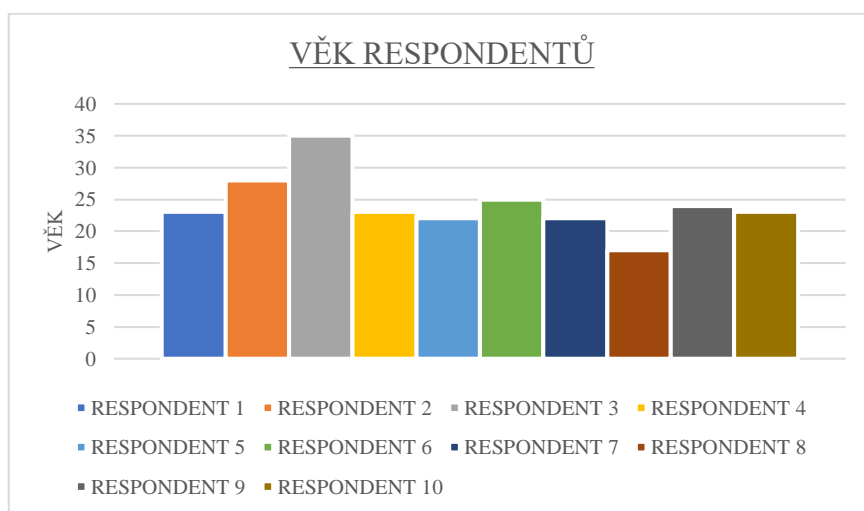
- Tóny navzájem ladí / Tóny jsou extrémně rozladěné,
- Barva je zcela konsonantní / Barva je zcela disonantní
- Lehce rozpoznatelné / Těžce rozpoznatelné.



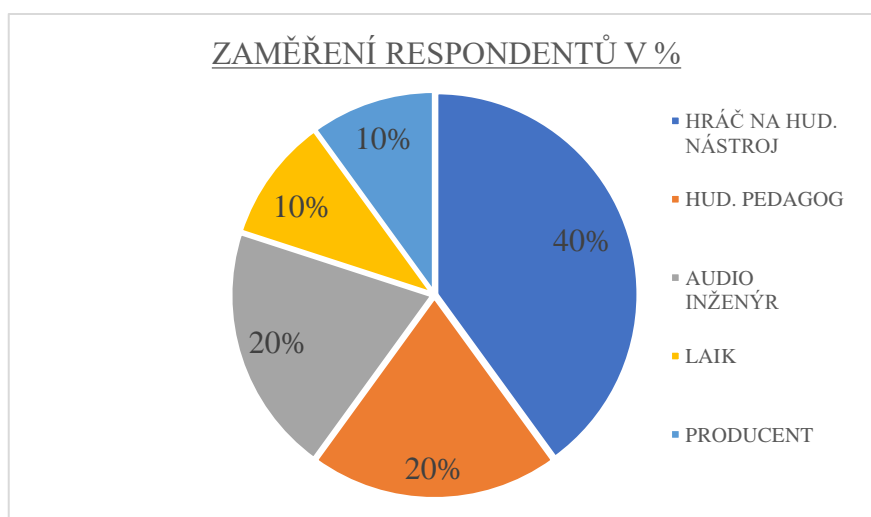
*Obrázek 10 – Screenshot pilotního internetového dotazníku*

## 6.2 RESPONDENTI

Do pilotního výzkumu bylo vybráno 10 respondentů v různé věkové kategorii i zaměřením. Největší množinu respondentů tvořili hráči na hudební nástroje, kterých bylo zastoupeno 40%. Dále byli zastoupeni respondenti z kategorie hudební pedagog a audio inženýr, kteří byli v zastoupení po 20%. V 10% byli zastoupeni hudební producenti a laická veřejnost. Takto diverzifikované portfolio respondentů mělo pomoci odhalit nedostatky dotazníku z širšího hlediska a zamezit tak nesrovnalostem při hlavním průzkumu na vzorku 100 respondentů (viz obr. č. 11 a obr. č. 12).



**Obrázek 11** – Věk respondentů pilotního dotazníku



**Obrázek 12** – Zaměření respondentů pilotního dotazníku v %

## 6.3 VÝSLEDEK PILOTNÍHO VÝZKUMU

Při analyzování výsledků byla použita metoda škálování Dunna a Kinga. Tato metoda umožňuje zobrazení procentuální škály zobrazující náklonost respondentů k jednotlivým stupňům škály. Pokud se polarita odpovědí pohybovala k jedné, nebo druhé straně, dotazovaný vzorek byl pochopen a mohli jsme mluvit o konkrétním výsledku. Pokud se preference respondentů rovnoměrně rozložila po celé škále, mohli jsme mluvit o výsledku nejasném, či neutrálním.

Bohužel v důsledku koronavirové krize, nouzového stavu a omezení svobodného pohybu občanů v ČR, nebylo možné se s jednotlivými respondenty osobně setkat a vysvětlit jim účel a postup tak detailně, jak bych si představoval. I tento faktor mohl mít vliv na výsledek a musel se brát v potaz.

Ve vyhodnocení byla velká četnost neutrálního výsledku z aritmetického průměru na škále, kde se zkoumala rozpoznatelnost vzorku. To mohlo být zapříčiněno špatným vysvětlením a nepochopením škály. Naopak jednoznačný výsledek i u takto malé skupiny byl ve skupině vzorků, které obsahovali ruchovou složku. Zde se většina respondentů shodla, že pokud je zvuk, který obsahuje ruchovou složku, nezáleží na míře rozladěnosti a bude pořád vnímán jako disonantní a extrémně rozladěný. Stejně tak bylo i u vzorků obsahující dominantní šumovou složku. U těchto vzorků se předpokládal konsonantní vjem barvy zvuku a respondenti se poměrně jednohlasně shodli na pravém opaku.

Vyhodnocení pilotního průzkumu ukázalo, na určité části poslechového testu, na které bylo potřeba se zaměřit a upravit je. Byli tak lehce změněny názvy jednotlivých sledovaných bipolárních škál, upraven a lépe vysvětlen návod k postupu, a byly změněny vzorové poslechové ukázky. Do návodu byly rovněž doplněny detailnější informace o důležitosti použití kvalitních reproduktorů a zvukové karty a podrobnější vysvětlení k jednotlivým škálám.

# 7 HLAVNÍ VÝZKUM

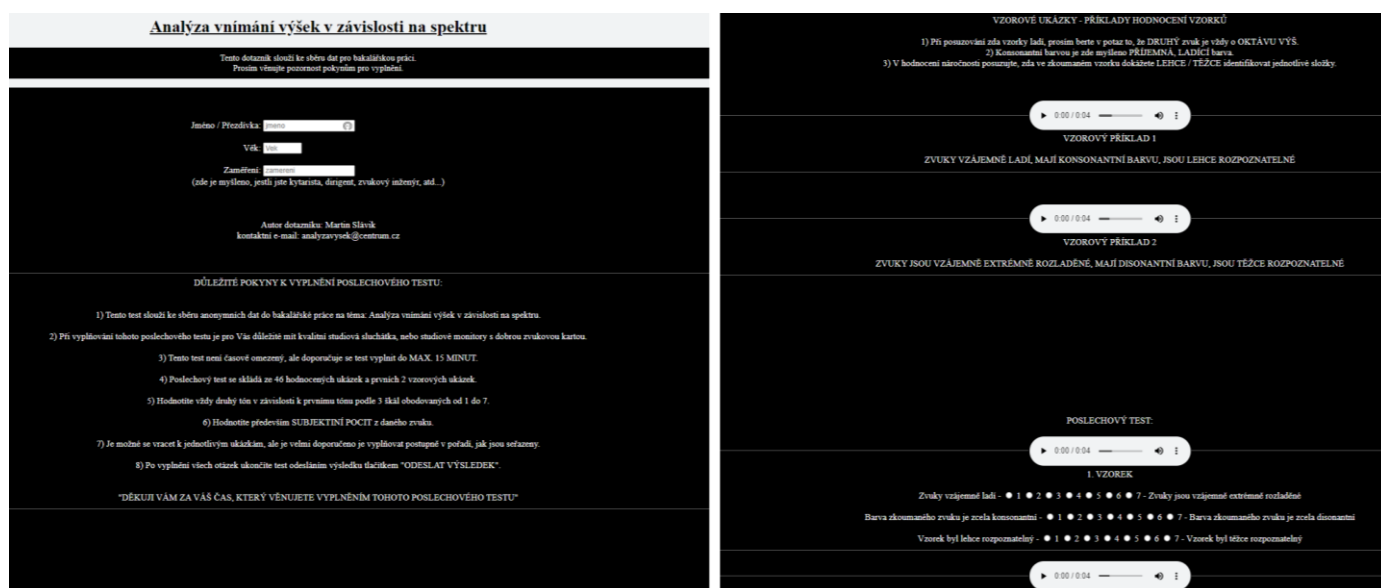
## 7.1 INTERNETOVÝ DOTAZNÍK

Díky třetí vlně pandemie korona-virového onemocnění se podmínky pro vyplnění hlavního výzkumu od pilotního průzkumu nezlepšili. Nebylo ani v toto období možné za respondenty přijít osobně s přesně kalibrovanými sluchátky a počítačem, na kterém by dotazník vyplňovali a měli by tak všichni respondenti stejné podmínky. Proto jsem i v tomto případě využil internetového dotazníku, jako v případě pilotního průzkumu.

Internetová stránka byla vytvořena v jazyce PHP a je dostupná na adrese: [www.analyzavysek.9e.cz](http://www.analyzavysek.9e.cz). Pro přehlednost jsem neměnil formát jedné stránky, na které je graficky oddělený návod, vzorové příklady a poslechový test. Kód celé stránky je přiložen do příloh této práce.

Samotný poslechový test je složený ze 46 vzorků. Všechny vzorky jsem graficky oddělil tak, aby dotazník působil celistvě a respondent měl jasný přehled, který vzorek právě zkoumá. Jednotlivé vzorky se skládaly z přehrávacího panelu (kde si respondent pustil zvukovou stopu a mohl si zde nastavit i např. hlasitost) a ze tří bipolárních škál.

Na závěr poslechového testu jsem přidal pole, kde respondenti mohli zanechat své připomínky bezprostředně hned po jeho vyplnění (zda něčemu nerozuměli, zda se test dal zvládnout apod.) a kontaktní e-mail, který byl vytvořen speciálně pro komunikaci s respondenty v případě potřeby (viz obr. č. 13).



Obrázek 13 – Screenshoty, ukázka internetového dotazníku



## 7.2 PRŮBĚH VÝZKUMU

Samotný průběh poslechového testu nebyl časově omezen. V tomto případě, kdy se dotazník nachází na internetové adrese, bylo pouze doporučeno respondentům vyplnit poslechový test do délky nejvýše 15 minut. Dále bylo respondentovi sděleno, že by měl v hodnocení vzorků postupovat dle pořadí, ve kterém se jednotlivé vzorky nachází (viz tab. č. 7), ale může se k jednotlivým vzorkům případně vracet. Také je mu i dovoleno si jednotlivé zvukové ukázky pouštět opakovaně bez omezení. Jelikož nebylo možné zajistit všem respondentům stejné podmínky pro vyplnění poslechového testu, bylo do návodu na začátku přidáno i doporučení využití kvalitní zvukové karty, studiových monitorů, nebo alespoň studiových sluchátek. Bohužel toto kritérium nebylo možné nijak kontrolovat ani ovlivnit jeho splnění.

Každý zkoumaný vzorek byl hodnocený na třech bipolárních škálách, jak už bylo zmíněno. Vždy bodově (1 – 7) a jednotlivé škály byly zvoleny následovně:

- Zvuky vzájemně ladí / Zvuky jsou vzájemně extrémně rozladěné
- Barva zkoumaného zvuku je zcela konsonantní / Barva zkoumaného vzorku je zcela disonantní
- Vzorek byl lehce rozpoznatelný / Vzorek byl těžce rozpoznatelný

Extrémním pólům těchto jednotlivých posuzovaných škál byla přiřazena krajní čísla stupnice. Zvukové vzorky byly složeny ze dvou částí, vždy z prvního tónu – sinusovky, která krátce zazní. Po krátké pauze se rozezní druhá část vzorku – zkoumaný zvuk, který má za úkol respondent ohodnotit. Hodnotila se tedy vždy jen druhá polovina zvukové nahrávky.

Na první škále se hodnotilo, jakou mírou respondent subjektivně vnímá dvojici tónu a zkoumaného zvuku, zda převládá vjem ladící, či neladící. Na druhé škále, jakou mírou subjektivně vnímá barvu zkoumaného zvuku, zda jako konsonantní, či disonantní. A poslední škála hodnotila, jak obtížné bylo tyto dva parametry identifikovat.

Následně, po absolvování všech 46 ukázek, byl poskytnut respondentovi prostor na zanechání připomínek a vzkazů. Až pod tímto polem bylo umístěno tlačítko pro odeslání výsledků dotazníku. Po úspěšném vyplnění dotazníku a odeslání se výsledek uložil do textového dokumentu, ze kterého se následně data přepsala do excelové tabulky, kde probíhalo finální vyhodnocení výzkumu. V textovém dokumentu se ukládala všechna data, která respondent poskytl – jméno, věk, zaměření, a následně pro každý zkoumaný vzorek oddělené odstavce s číselnými odpověďmi, pojmenované pořadovým číslem vzorku.

## 7.3 VOLBA VZORKŮ

Volba správných vzorků při posuzování vlivu harmonického spektra na vjem výšky má na validitu testu zásadní vliv. Výčet variant, které se daly zkoumat, bylo nepřehledné množství. Proto bylo rovněž zásadní i vybrat specifickou část vzorků, na kterou se tato práce zaměřila, a kterou pak blíže zkoumala.

V této práci jsem se zaměřil na zkoumání vlivu:

- Vlivu inharmonicit a deformací ve formantových oblastí
- vlivu jednotlivých složek spektra a diferenčních tónů v prvním pásmu (tzn. 1-8 harmonická složka)
- vlivu ruchových barev a šumu na celkový vjem výšky zvuku

Aby se správně odhalily a ověřily výsledky a předpoklady, musely se udělat skupiny různých zvukových vzorků v kombinaci i s kontrolními vzorky. Zvolil jsem proto celkem čtyři hlavní skupiny, ve kterých se následně nacházely různé druhy vytvořených zvuků. V rámci hodnocení byl ke každé skupině vypracován předpoklad, jaký je očekávaný výsledek od respondentů, který se následně po vyhodnocení rovněž srovnával s reálnými výsledky od respondentů.

Poslechový test byl vytvořen melodicky, tzn. první tón a zkoumaný zvuk hraje odděleně. Rozhodl jsem se konstruovat test takto, protože při souběžném znění hlavního tónu a zkoumaného vzorku, při rozladění zkoumaného vzorku vznikaly poměrně silné rázy. Díky těmto rázům by mohlo dojít při vyhodnocení ke zkreslení výsledků, protože velká část muzikantů ladí právě na přítomnost těchto rázů. Nemuseli by tak teoreticky identifikovat výšku tónu podle subjektivního pocitu ale podle přítomnosti, nebo absence těchto rázů.

Část vzorků vznikla upravením zvuků samplovaných hudebních nástrojů a část byla vytvořena aditivní syntézou ze sinusoidních průběhů. U vzorků nástrojů byly vybrány tyto nástroje: agogo, akordeon, klarinet, hoboje a zvon. Všechny tyto vzorky jsou přehledně vidět viz tab. č. 6.

Pořadí vzorků bylo pečlivě vybráno tak, aby co nejméně šli extrémy vzorků z jednotlivých skupin ihned po sobě a aby tak posluchače minimálně ovlivňoval v rozhodování vzorek předchozí.

V hlavním výzkumu bylo zachováno pořadí vzorků z pilotního průzkumu, jelikož se na malém vzorku 10 lidí jasně neprokázal negativní vliv pořadí, ale prokázal se nedostatek v návodu jak postupovat a ve špatně zvolených vzorových ukázkách.

### 7.3.1 SKUPINA VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY

V této skupině vzorků se měřila míra vlivu sudých a lichých složek harmonického spektra na celkový vjem výšky. V téhle skupině jsou celkem čtyři vzorky, z toho dva vzorky jsou upravené samplly hudebních nástrojů a dva vzorky jsou vymodelované aditivní syntézou. Vzorek hoboje patří do skupiny dvojplátkových dechových hudebních nástrojů a má dominantní sudé harmonické složky ve spektru. Oproti tomu vzorky klarinetu patří do skupiny jednoplátkových dechových hudebních nástrojů a mají dominantní liché harmonické složky ve spektru. Na první pohled se jedná o dva podobné nástroje, lišící se hlavně formou tvorby tónu (jednoplátek a dvojplátek). Proto jsou výbornými zástupci pro výzkum do této kategorie. Na podpoření a ověření předpokladu, že sudé harmonické složky ve spektru vytvářejí konsonantnější vjem, zdají se lépe ladící a liché harmonické opačně podporují disonanci, ostrost tónu a zdají

se více neladící, jsem aditivní syntézou vytvořil dva vzorky jen z těchto harmonických složek. (viz tab. č. 2).

Č. VZORKU	KATEGORIE	DRUH	HARMONICKÉ SLOŽKY	VÝČET HARMONICKÝCH SLOŽEK	MÍRA ROZLADĚNOSTI
18	VZORKY, KDE JSOU SUDÉ & LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY	SYNTÉZA 1	SUDÉ	2.,4.,6.,8.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
7					NALADĚNÉ
29		SYNTÉZA 2	LICHÉ	3.,5.,7., 9.	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
1					NALADĚNÉ
5		NÁSTROJ 1	HOBOJ (SUDÉ DOMINANTNÍ)	1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
17					NALADĚNÉ
30		NÁSTROJ 2	KLARINET (LICHÉ DOMINANTNÍ)	1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
22					NALADĚNÉ

**Tabulka 2 – Vzorky se sudými a lichými harmonickými složkami**

Syntézou vytvořené sudé vzorky se skládají z 2., 4., 6. a 8. harmonické složky a podporují tonalitu. V tomto případě 2. harmonická složka svírá s fundamentem interval oktávy, 4. harmonická složka svírá s fundamentem interval opět oktávy, 6. harmonická složka svírá s fundamentem interval kvinty, 8. harmonická složka svírá s fundamentem interval oktávy. Proto je u tohoto vzorku předpokládáný celkový vjem velmi konsonantní a tonální. Měl by tedy velmi dobře ladit i se rozpoznat.

Syntézou vytvořené liché vzorky se skládají z 3., 5., 7. a 9. harmonické složky a podporují ostrost a disonanci. V tomto případě 3. harmonická složka svírá s fundamentem interval kvinty, 5. harmonická složka svírá s fundamentem interval tercie, 7. harmonická složka svírá s fundamentem interval malé septimy a 9. harmonická složka svírá s fundamentem velké sekundy. Proto je u tohoto vzorku předpokládáný celkový vjem velmi disonantní a netonální. Měl by se hůře ladit a měl by být špatně rozpoznatelný.

### 7.3.2 SKUPINA VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU

V této skupině se měřila míra vlivu různých kombinací vyšších harmonických složek v prvním pásmu. Skupina obsahuje celkem čtyři vzorky a všechny jsou vymodelované pomocí aditivní syntézy. Každý vzorek obsahuje 1., 2., 4. a 8. harmonickou složku, ke které je přidána 3., 5., 6., nebo 7. harmonická složka. Neměnná část vzorku byla zvolena takto proto, protože tyto vyšší harmonické složky (1., 2., 4., 8.) jsou vždy v intervalu primy nebo oktávy a posilují tak konsonantní vjem. (viz tab. č. 3).

Č. VZORKU	KATEGORIE	DRUH	HARMONICKÉ SLOŽKY	VÝČET HARMONICKÝCH SLOŽEK	MÍRA ROZLADĚNOSTI
6	VZORKY VZNIKLÉ KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU	SYNTÉZA 3	KOMBINACE	1.,2.,4.,8. + 3.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
35					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
20					NALADĚNÉ
23		SYNTÉZA 4	KOMBINACE	1.,2.,4.,8. + 5.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
44					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
9					NALADĚNÉ
16		SYNTÉZA 5	KOMBINACE	1.,2.,4.,8. + 6.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
3					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
34					NALADĚNÉ
40		SYNTÉZA 6	KOMBINACE	1.,2.,4.,8. + 7.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
24					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
12					NALADĚNÉ

**Tabulka 3** – Vzorky vzniklé kombinací vyšších harmonických složek v prvním pásmu

Vzorek, kde je přidaná 3. harmonická složka svírá s fundamentem konsonantní interval kvinty. U této složky jsou diferenční tóny:  $3 - 1 = 2$ ,  $3 - 2 = 1$ ,  $4 - 3 = 1$  a  $8 - 3 = 5$ . Dvakrát tak subjektivně doplňuje interval 1. harmonické složky – fundament, jednou doplňuje interval 2. harmonické složky – oktávu a jednou 5. harmonické složky – velkou tercii. Proto by celkový vjem tohoto vzorku měl zdát jako konsonantní, dutý, který se bude dobře ladit.

Vzorek s přidanou 5. harmonickou složkou svírá s fundamentem disonantní interval velké tercie. V tomto vzorku se nachází diferenční tóny:  $5 - 1 = 4$ ,  $5 - 2 = 3$ ,  $5 - 4 = 1$ ,  $8 - 5 = 3$ . Tyto tóny tak subjektivně posilují dvakrát interval kvinty, jednou interval kvarty a jednou posilují základní tón. Pátá harmonická složka přidává rovněž nazální barvu, proto má tato kombinace vyšších harmonických složek za následek, že celkový vjem tónu se předpokládá více jako zvonivý a více disonantní a nebude se ladit dobře.

Vzorek, u kterého je přidaná 6. harmonická složka, svírá s fundamentem konsonantní interval kvinty. Diferenční tóny tohoto vzorku jsou:  $6 - 1 = 5$ ,  $6 - 2 = 4$ ,  $6 - 4 = 2$ ,  $8 - 6 = 2$ . Subjektivně tedy budou posilovat dvakrát interval oktávy, jednou interval kvarty a jednou interval velké tercie. Díky tomuto složení zvukového vzorku předpokládáme, že vjem bude velmi jasný a konsonantní a díky posílené konsonantní oktávové složce se bude velmi dobře rozeznávat ladění.

Vzorek, kde je přidaná 7. harmonická složka svírá s fundamentem disonantní interval malé septimy. Diferenční tóny u tohoto vzorku jsou:  $7 - 1 = 6$ ,  $7 - 2 = 5$ ,  $7 - 4 = 3$ ,  $8 - 7 = 1$ . Posiluje se díky těmto tónům subjektivně disonantní interval malé tercie a interval velké tercie. Zároveň se posiluje i konsonantní interval kvinty a fundament. V tomto případě se vzorek silně obohacuje lichostí a předpokládá se, že bude znít plně, zvonivě a velmi disonantně. Díky jeho disonanci by mělo být obtížně rozpoznatelné ladění.

### 7.3.3 SKUPINA VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT A UPRAVENÍMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI

V této vzorkové skupině bylo měřeno, jestli má míra deformace přední, či zadní formantové oblasti vliv na celkový vjem a identifikaci výšky zvuku u vzorků samplovaných nástrojů se střední nebo vysokou mírou inharmonicit. A s různou šířkou spektra. Bylo zde použito 6 druhů vzorků a všechny použité vzorky byly upravené nasamplované hudební nástroje. Tyto zvukové samplý byly hudebních nástrojů agoga, akordeonu a zvonu. U každého nástroje byla identifikovaná 9. až 16. harmonická složka, kde se právě nachází formantová oblast a toto pásmo bylo zesíleno o + 6dB. Zkoumáme zde, jakou mírou tato deformace ve formantové oblasti působí na jednotlivé vzorky, které mají různou míru inharmonicit ve spektru. Očekává se zde, že u žádného ze zkoumaných vzorků nebude mít formantová oblast vliv na rozpoznatelnost výšky zvuku. Oproti tomu předpokládáme, že ve vzorcích s větší mírou inharmonicit bude rozpoznatelnost výšky pro respondenty náročnější (viz tab. č. 4).

U vzorků zvonů je vysoká míra těchto inharmonicit a široké spektrum. Můžeme proto předpokládat náročnější identifikaci výšky zvuku. Může se tak jevit jako mírně nadladěný nebo podladěný. U tohoto typu vzorků se dále očekává zvýšený vjem disonanční barvy.

Vzorky hudebního nástroje agoga na rozdíl od vzorku zvonu má spektrum velmi úzké. Inharmonicita těchto vzorků je rovněž velmi vysoká, a proto předpokládáme spíše disonanční vjem. Vzorky budou velmi náročné na rozpoznání výšky a barva bude velmi zvonivá a disonanční.

Vzorky akordeonu mají střední míru inharmonicit, které se vyskytují od 5. harmonické složky. Tyto vzorky mají velmi široké spektrum a můžeme u nich předpokládat, že se barevně budou jevit jako disonančnější. Díky širokému spektru a inharmonicitám začínajícím až od 5. harmonické složky můžeme očekávat lepší rozpoznatelnost výšky zvuku.

Č. VZORKU	KATEGORIE	DRUH	HARMONICKÉ SLOŽKY	VÝČET HARMONICKÝCH SLOŽEK	MÍRA ROZLADĚNOSTI
15	VZORKY NÁSTROJŮ S INHARM. A UPRAVENÝMI FORM. OBLASTMI	NÁSTROJ 3	ZVON S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S–DOM. PŘI 9.-12. HARM.	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
4					NALADĚNÉ
13		NÁSTROJ 4	ZVON S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S–DOM. PŘI 13.-16. HARM.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
28					NALADĚNÉ
19		NÁSTROJ 5	AKORDEON S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S–DOM. PŘI 9.-12. HARM.	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
36					NALADĚNÉ
42		NÁSTROJ 6	AKORDEON S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S–DOM. PŘI 13.-16. HARM.	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
46					NALADĚNÉ
32		NÁSTROJ 7	AGOGO S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S. – DOM. PŘI 9.-12. HARM.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
25					NALADĚNÉ
45		NÁSTROJ 8	AGOGO S POSÍLENOU FORMANTOVOU OBLASTÍ	1.-16. HAR.S. – DOM. PŘI 13.-16. HARM.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
41					NALADĚNÉ

**Tabulka 4** – Vzorky nástrojů s inharmonicitami a upravenými formantovými oblastmi

#### 7.3.4 SKUPINA VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM

U této skupiny vzorků jsem se zaměřil na měření míry inharmonicit v prvním pásmu, ruchových složek a šumu ve spektru na celkový vjem výšky. Tato skupina obsahuje celkem 6 druhů vzorků a všechny použité vzorky byly vymodelované aditivní syntézou a jejich seznam je uveden viz tab. č. 5. U měření vlivu inharmonicit ve spektru je zkoumáno, jaká část prvního pásma má do jaké míry vliv na rozpoznatelnost výšky zvuku a zda vysoká míra inharmonicit v prvním pásmu, při úzkém spektru, negativně ovlivní správnou identifikaci výšky zvuku. Byly zde použity celkem 4 vzorky. Zbylé dva vzorky zkoumaly, do jaké míry ovlivní správné rozpoznání výšky ruch a šum.

První dvojice vzorků se skládá z 1., 2., 3., 4., 6. a 8. harmonické složky. V tomto složení jsou intervaly tercií, kvint a oktáv. Tyto harmonické složky byly rozděleny na dvě pásma: nosné harmonické složky (1., 2., 3.harmonická složka) a nosné barvocitné složky (4., 6., 8. harmonická složka). Tyto jednotlivá pásma byla rozladěna o 15 centů. U vzorků s rozladěnými nosnými harmonickými složkami se dá očekávat, že respondenti je budou vnímat více rozladěně ale s konsonantnější barvou. Při tom vzorky, které mají rozladěné nosné barvocitné složky, naopak budou respondenti vnímat více jako disonantní v barvě ale celkově ladící.

Další dvojice vzorků zkoumající inharmonicity se skládá z 1., 2., 3., a 4. harmonické složky. V jednom případě byla rozladěná 2. a 4. harmonická složka o 15 centů a ve druhém byla o 15 centů rozladěná pouze 2. harmonická. Cílem u této skupiny bylo zjistit, zda je 2. a 4. harmonická složka (k fundamentu svírá interval oktávy) kritická na identifikování a správné určení výšky tónu. Rovněž se zde zkoumalo, jaký má vliv při úzkém spektru rozladěná pouze 2. harmonická složka.

Byla vytvořena jedna ruchová barva, ve které se nacházely shluky u 1., 3., a 5. harmonické a byla zde i přidána klustrová oblast. Zde bylo cílem zjistit, jestli je možné při ruchových zvucích identifikovat a přiřadit jim výšku tónu.

Vzorek, kde se zkoumala míra vlivu šumu na vjem výšky zvuku, byl vymodelován s 2., 4., a 6. harmonickou složkou (intervaly k fundamentu jsou oktáva – oktáva – kvinta). Tyto jednotlivé složky byly rozladěné o 9 centů a následně zasazeny do šumu tak, aby šum byl dominantní prvek a tento složený tón byl pouze jemně slyšitelný. Za cíl zde bylo ověřit, zda šum dokáže dopomoci k tonálnímu citění a do jaké míry překrývá a maskuje vzniklé disonance.

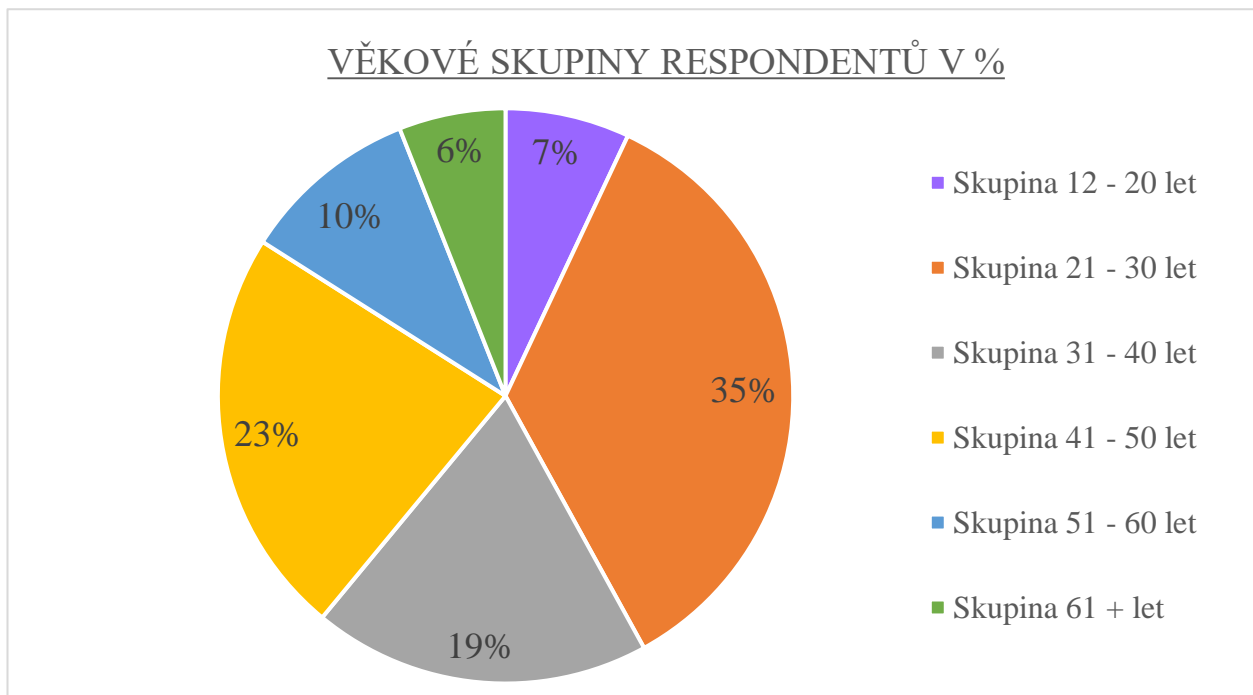
Č. VZORKU	KATEGORIE	DRUH	HARMONICKÉ SLOŽKY	VÝČET HARMONICKÝCH SLOŽEK	MÍRA ROZLADĚNOSTI
26	VZORKY S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT RUCHOVÝMI S. A ŠUMEM	SYNTÉZA 7	6 HARM.S. - NOSNÉ HARM. S. JSOU ROZLADĚNÉ	4., 6., 8. + 1., 2., 3. - ROZLADĚNÉ	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
38					NALADĚNÉ
21		SYNTÉZA 8	6 HARM. S. - NOSNÉ BARV. S. JSOU ROZLADĚNÉ	1., 2., 3. + 4., 6., 8. - ROZLADĚNÉ	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
43					NALADĚNÉ
27		SYNTÉZA 9	4 HARMONICKÉ SLOŽKY	1.,3.,+ 2., 4. - ROZLADĚNÉ	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
11					NALADĚNÉ
39		SYNTÉZA 10	4 HARMONICKÉ SLOŽKY	1.,3.,4. + 2. - ROZLADĚNÁ	MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
8					NALADĚNÉ
2		SYNTÉZA 11	RUCHOVÁ BARVA	SHLUKY U 1.,3., 5. HARM. S. + KLASTROVÁ O.	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
33					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
14					NALADĚNÉ
37		SYNTÉZA 12	ROZLADĚNÉ 3 HARM. S. + ŠUM	2., 4., 6. + ŠUM	VELMI ROZLADĚNÉ (15 CENTŮ)
10					MÍRNĚ ROZLADĚNÉ (9 CENTŮ)
31					NALADĚNÉ

**Tabulka 5 – Vzorky s různou mírou inharmonicit, ruchovými složkami a šumem**

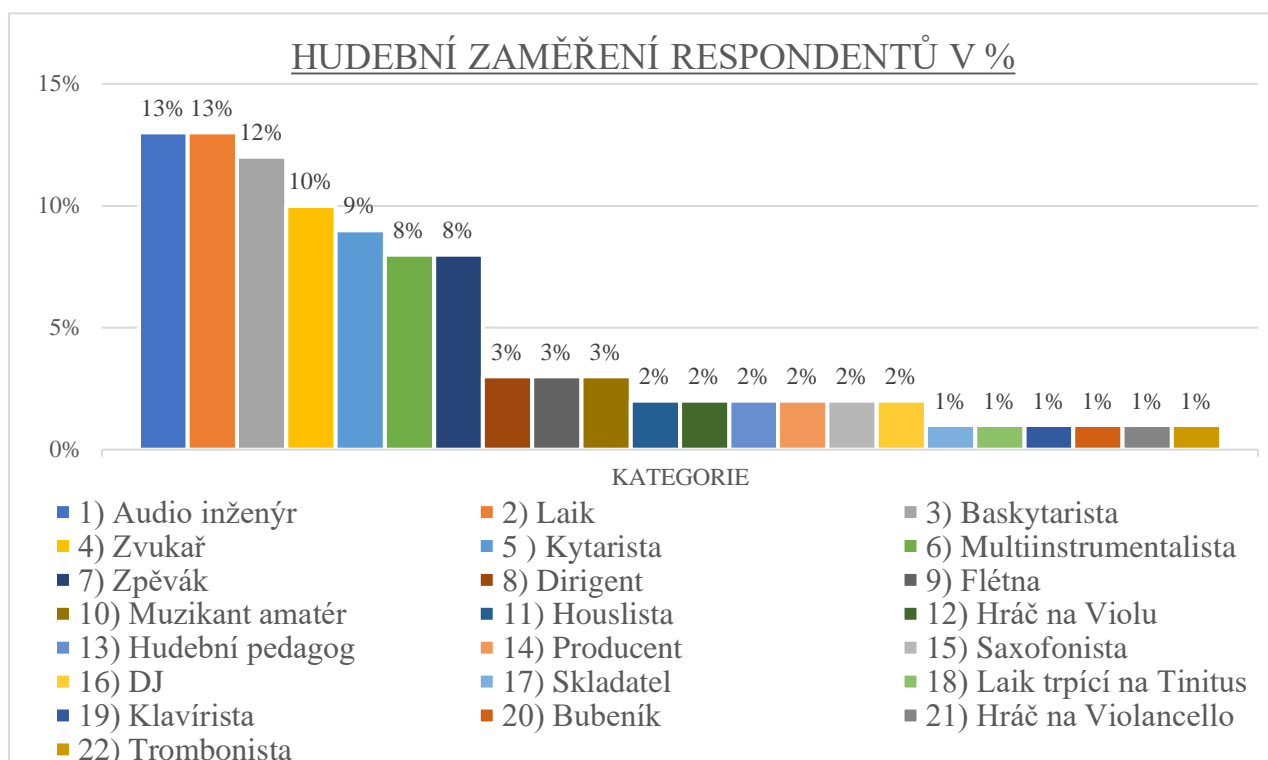
## 7.4 RESPONDENTI

Výzkumu se účastnilo 100 respondentů, u kterých se zjišťovalo v rámci dotazníku hudební zaměření, věk, jednotlivé odpovědi k poslechovému testu a zpětná vazba (nebyla povinná). Respondenti byli namíchaní z různých skupin tak aby se pokrylo široké spektrum hudebního zaměření. Do poslechového testu jsem zapojil i hudební laiky, jelikož mi přišlo vhodné sledovat, zda tato skupina ovlivní výsledek, či nikoliv.

V největším měřítku dotazník vyplnily hráči na různé hudební nástroje. Avšak zajímavé je, že se poslechového testu účastnilo celkem 14% hudebních laiků a dokonce jeden z nich s vadou sluchu Tinitus. Respondenty jsem dále rozřadil i do věkových skupin pro lepší pochopení výsledků a největší zastoupení měla skupina respondentů ve věkovém rozmezí 21-30 let. Vše je vidět na grafech níže na obr. č. 14, a obr. č. 15.



**Obrázek 14** – Věkové skupiny respondentů v %



**Obrázek 15** – Hudební zaměření respondentů v %



SEZNAM VZORKŮ			
SYNTÉZA 1	SUDÉ	C	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 1	SUDÉ	C	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 2	LICHÉ	C	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 2	LICHÉ	C	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 1	HOBOJ - S	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
NÁSTROJ 1	HOBOJ - S	E	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 2	KLARINET - L	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
NÁSTROJ 2	KLARINET - L	H	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 3	ZVON 9-12	H	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
NÁSTROJ 3	ZVON 9-12	H	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 4	ZVON 13-16	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
NÁSTROJ 4	ZVON 13-16	G	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 5	AKORDEON 9-12	C	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
NÁSTROJ 5	AKORDEON 9-12	C	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 6	AKORDEON 13-16	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
NÁSTROJ 6	AKORDEON 13-16	A	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 7	AGOGO 9-12	E	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
NÁSTROJ 7	AGOGO 9-12	E	NALADĚNÉ
NÁSTROJ 8	AGOGO 13-16	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
NÁSTROJ 8	AGOGO 13-16	H	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 7	6H - N	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 7	6H - N	G	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 8	6H - B	C	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 8	6H - B	C	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 9	4H - 2,4	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 9	4H - 2,4	A	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 10	4H - 2	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 10	4H - 2	E	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	NALADĚNÉ
SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	NALADĚNÉ

*Tabulka 6 – Barevně seřazený seznam použitých vzorků dotazníku*

POŘADÍ VZORKŮ	VYBRANÉ POŘADÍ VZORKŮ			
0-1	1. VZOR			
0-2	2. VZOR			
1	SYNTÉZA 2	LICHÉ	C	NALADĚNÉ
2	SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
3	SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
4	NÁSTROJ 3	ZVON 9-12	H	NALADĚNÉ
5	NÁSTROJ 1	HOBOJ - S	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
6	SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
7	SYNTÉZA 1	SUDÉ	C	NALADĚNÉ
8	SYNTÉZA 10	4H - 2	E	NALADĚNÉ
9	SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	NALADĚNÉ
10	SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
11	SYNTÉZA 9	4H - 2,4	A	NALADĚNÉ
12	SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	NALADĚNÉ
13	NÁSTROJ 4	ZVON 13-16	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
14	SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	NALADĚNÉ
15	NÁSTROJ 3	ZVON 9-12	H	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
16	SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
17	NÁSTROJ 1	HOBOJ - S	E	NALADĚNÉ
18	SYNTÉZA 1	SUDÉ	C	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
19	NÁSTROJ 5	AKORDEON 9-12	C	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
20	SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	NALADĚNÉ
21	SYNTÉZA 8	6H - B	C	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
22	NÁSTROJ 2	KLARINET - L	H	NALADĚNÉ
23	SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
24	SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
25	NÁSTROJ 7	AGOGO 9-12	E	NALADĚNÉ
26	SYNTÉZA 7	6H - N	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
27	SYNTÉZA 9	4H - 2,4	A	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
28	NÁSTROJ 4	ZVON 13-16	G	NALADĚNÉ
29	SYNTÉZA 2	LICHÉ	C	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
30	NÁSTROJ 2	KLARINET - L	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
31	SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	NALADĚNÉ
32	NÁSTROJ 7	AGOGO 9-12	E	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
33	SYNTÉZA 11	SHLUKY-RUCH	H	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
34	SYNTÉZA 5	KOMB - 6	A	NALADĚNÉ
35	SYNTÉZA 3	KOMB - 3	G	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
36	NÁSTROJ 5	AKORDEON 9-12	C	NALADĚNÉ
37	SYNTÉZA 12	3H+ŠUM	G	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
38	SYNTÉZA 7	6H - N	G	NALADĚNÉ
39	SYNTÉZA 10	4H - 2	E	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
40	SYNTÉZA 6	KOMB - 7	E	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
41	NÁSTROJ 8	AGOGO 13-16	H	NALADĚNÉ
42	NÁSTROJ 6	AKORDEON 13-16	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
43	SYNTÉZA 8	6H - B	C	NALADĚNÉ
44	SYNTÉZA 4	KOMB - 5	A	ROZLADĚNÉ O 9 CENTŮ
45	NÁSTROJ 8	AGOGO 13-16	H	ROZLADĚNÉ O 15 CENTŮ
46	NÁSTROJ 6	AKORDEON 13-16	A	NALADĚNÉ

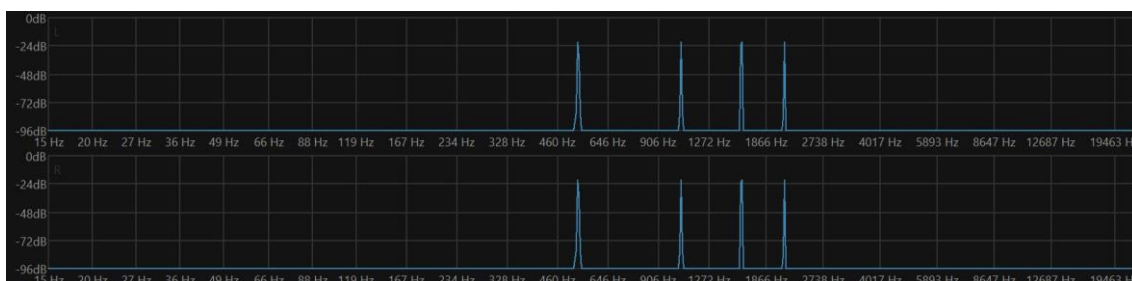
*Tabulka 7 – Pořadí vzorků v dotazníku*

## 8 SPEKTROGRAFY VZORKŮ

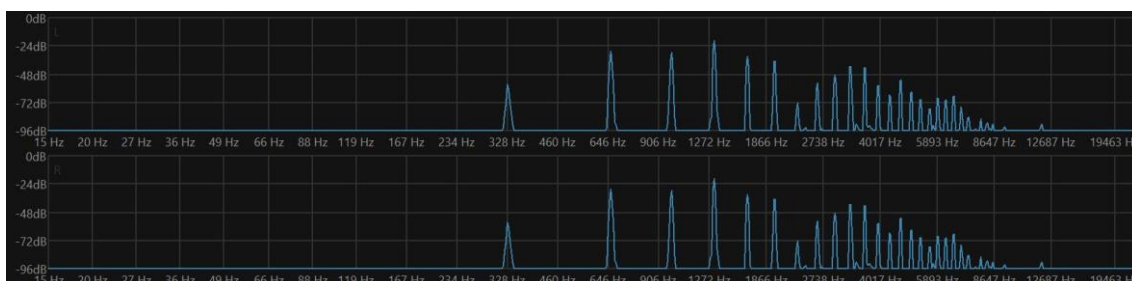
### 8.1 SPEKTROGRAFY VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY



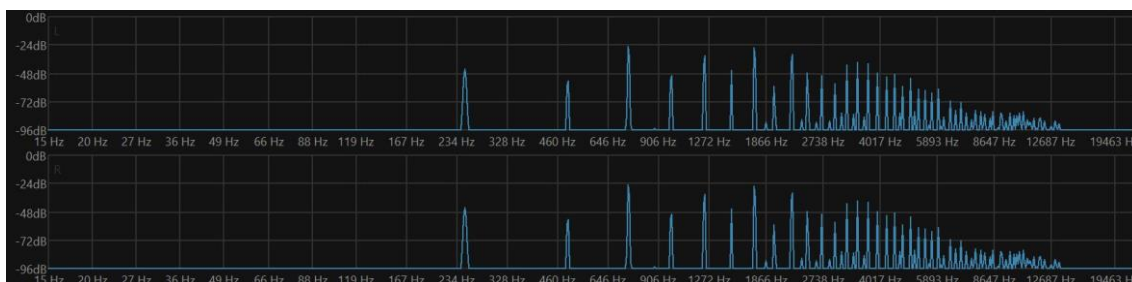
*Obrázek 16 – Vzorky syntézy č.1 - se sudými harmonickými složkami*



*Obrázek 17 – Vzorky syntézy č.2 - s lichými harmonickými složkami*



*Obrázek 18 – Vzorky nástroje č.1 – Hoboj se sudými dominantními harmonickými složkami*

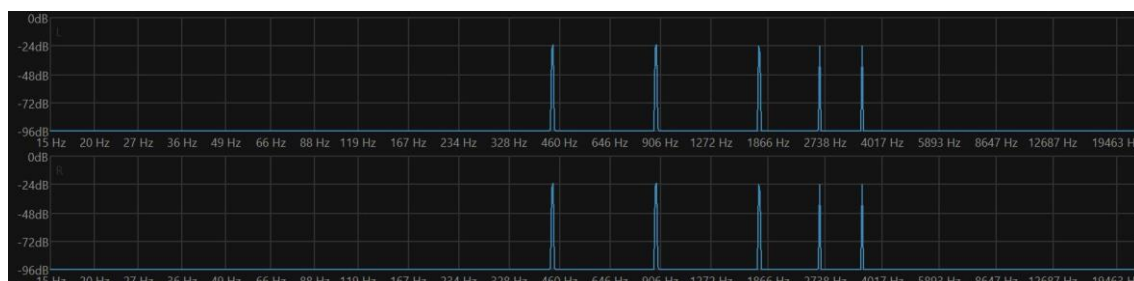


*Obrázek 19 – Vzorky nástroje č.2 - Klarinetu s lichými dominantními harmonickými složkami*

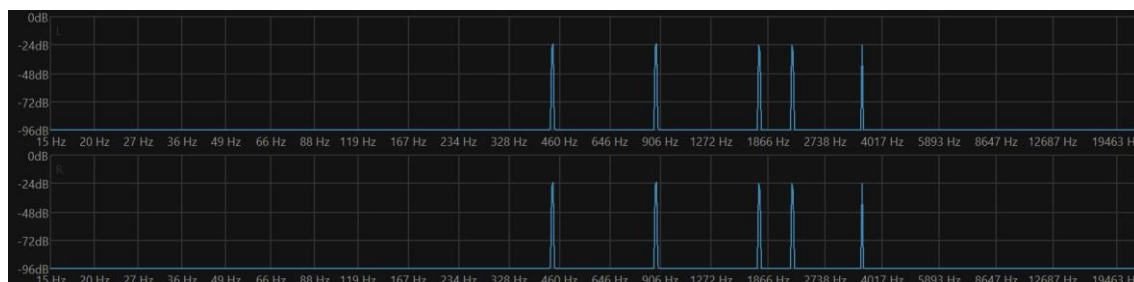
## 8.2 SPEKTROGRAFY VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU



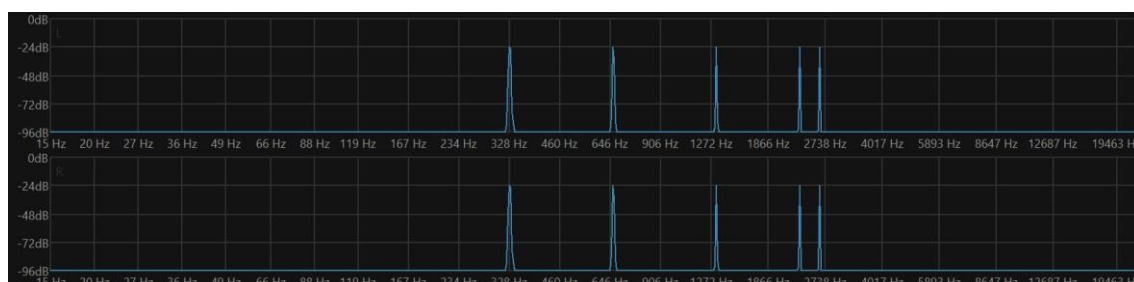
*Obrázek 20 – Vzorky syntézy č.3 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 3. harmonickou složkou*



*Obrázek 21 – Vzorky syntézy č.4 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 5. harmonickou složkou*

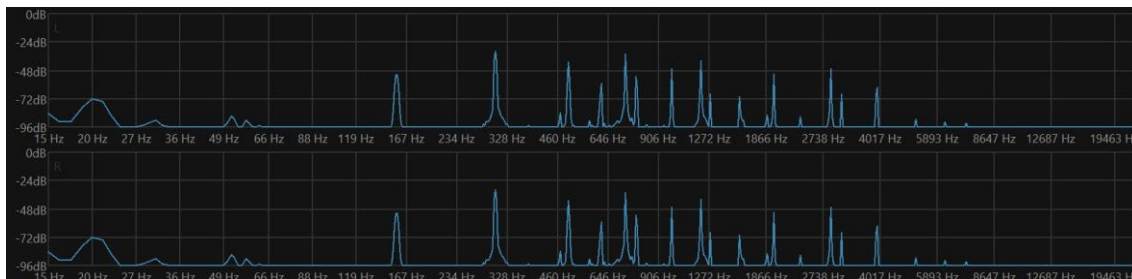


*Obrázek 22 – Vzorky syntézy č.5 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 6. harmonickou složkou*

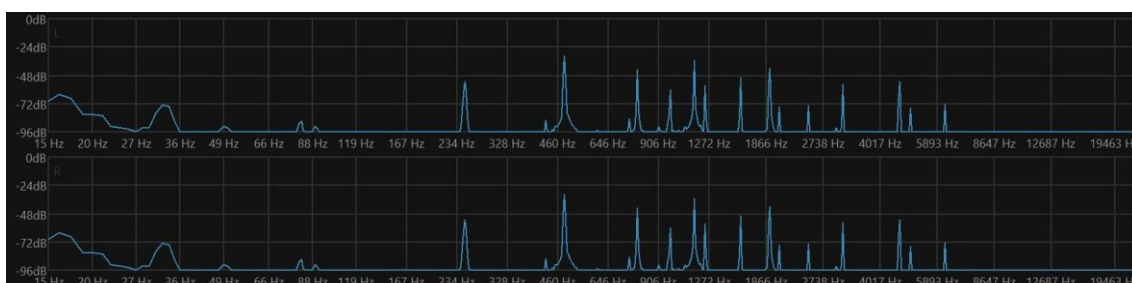


*Obrázek 23 – Vzorky syntézy č.6 - kombinace 4 harmonických složek s přidanou 7. harmonickou složkou*

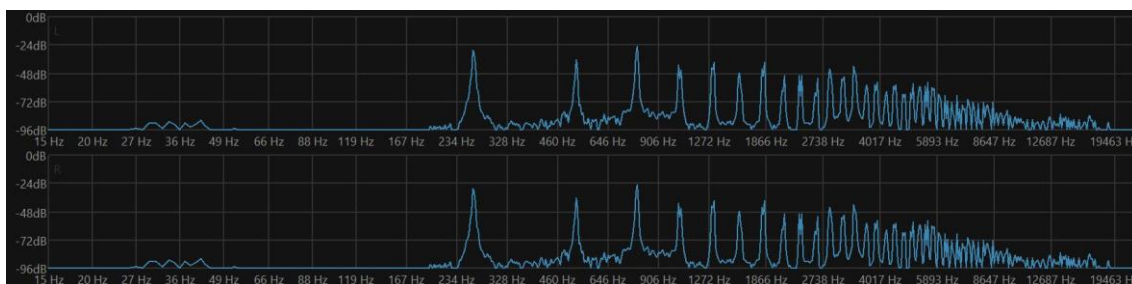
### 8.3 SPEKTROGRAFY VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICITA UPRAVENÝMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI



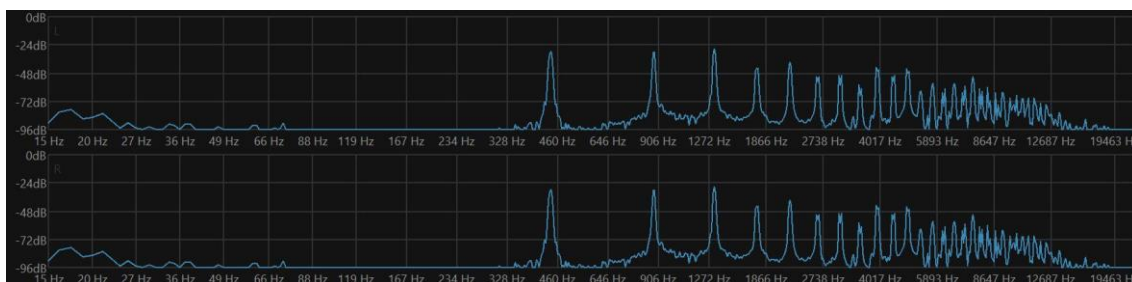
**Obrázek 24** – Vzorky nástroje č.3 - Zvon s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce



**Obrázek 25** – Vzorky nástroje č.4 - Zvon s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce



**Obrázek 26** – Vzorky nástroje č.5 - Akordeon s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce

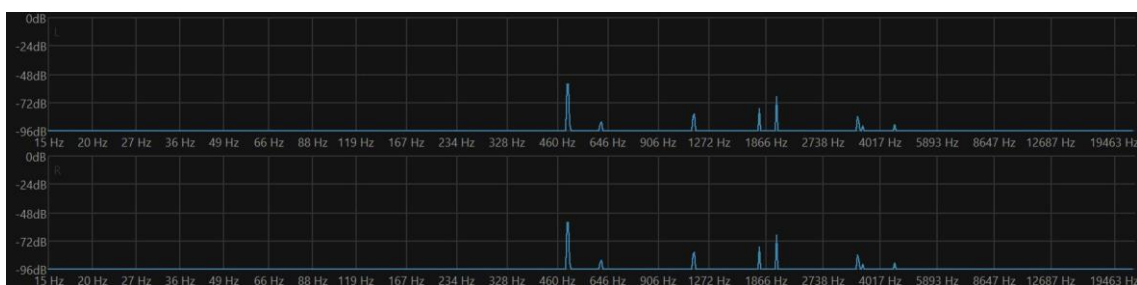


**Obrázek 27** – Vzorky nástroje č.6 - Akordeon s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce



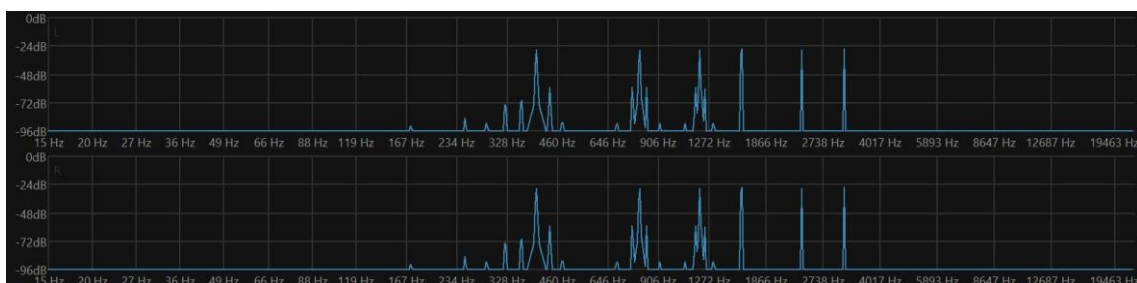


**Obrázek 28** – Vzorky nástroje č.7 - Agogo s upravenou formantovou oblastí při 9. - 12. harmonické složce

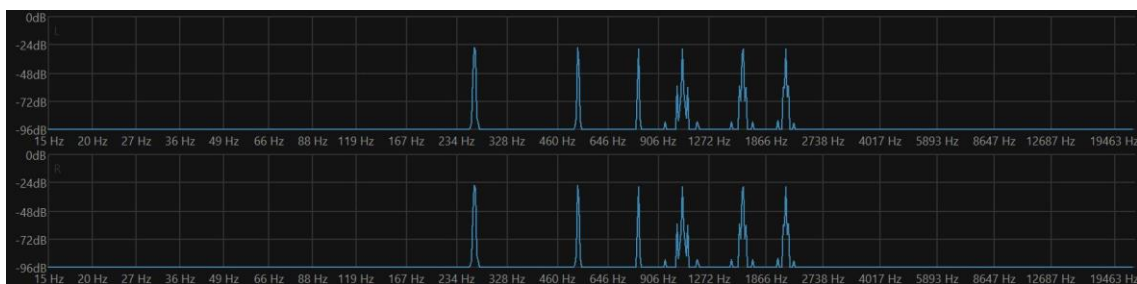


**Obrázek 29** – Vzorky nástroje č.7 - Agogo s upravenou formantovou oblastí při 13. - 16. harmonické složce

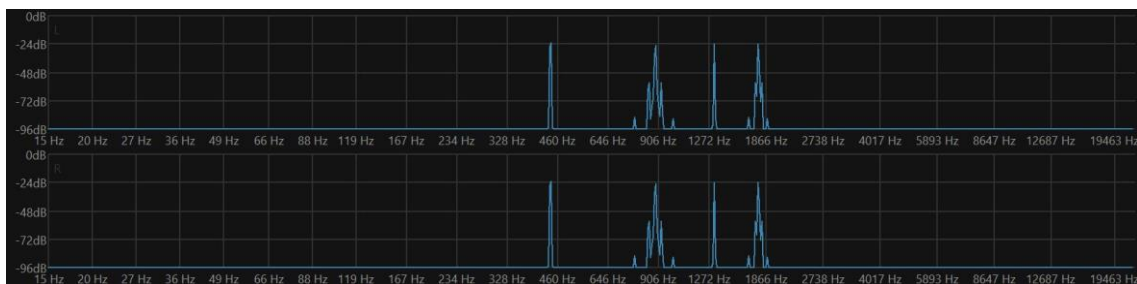
## 8.4 SPEKTROGRAFY VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM



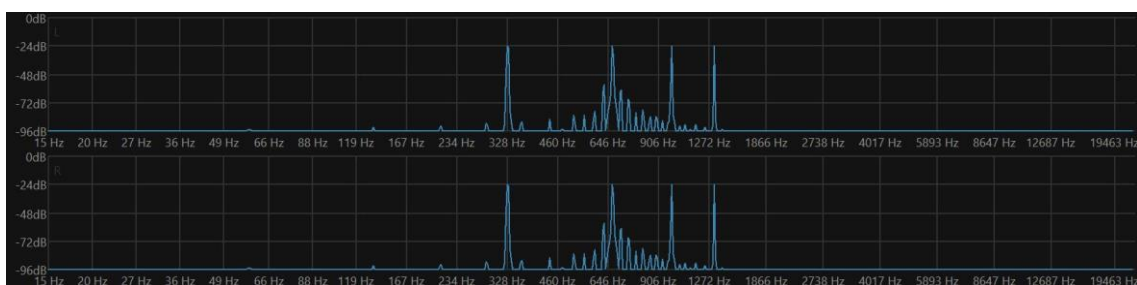
**Obrázek 30** – Vzorky syntézy č.7 - 6 harmonických složek - Nosné složky jsou rozladěné



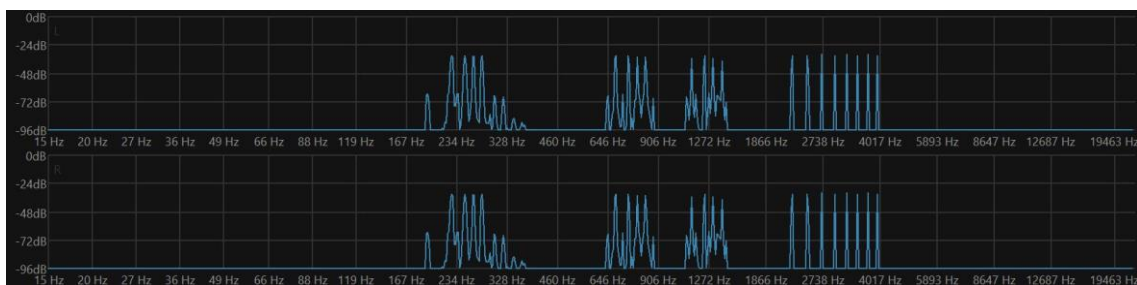
**Obrázek 31** – Vzorky syntézy č.8 - 6 harmonických složek - Barvocitné složky jsou rozladěné



**Obrázek 32** – Vzorky syntézy č.9 - 4 harmonické složky s 2. a 4. harmonickou složkou rozladěnou



**Obrázek 33** – Vzorky syntézy č.10 - 4 harmonické složky s 2. harmonickou složkou rozladěnou



**Obrázek 34** – Vzorky syntézy č.11 - Ruchová barva se shluky u 1., 3. a 5 harmonické složky



**Obrázek 35** – Vzorky syntézy č.12 - Rozladěné 3 harmonické složky + šum

## 9 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Při analyzování výsledků byla použita metoda škálování Dunna a Kinga, stejně jako při pilotním průzkumu. Díky této metodě dokážeme zobrazit procentuální náklonost respondentů k jednotlivým stupňům škály u jednotlivých vzorků. Pro přehlednost byly jednotlivé stupně škály poslechového testu (1 – 7) nahrazeny termíny „Mimořádně“, „Velmi“, „Trochu“ a „Ani jeden“. Tyto termíny jsou v tabulce zobrazeny počátečními písmeny „M“, „V“, „T“ a termín „Ani jeden“ byl nahrazen „0“.

U každé skupiny vzorků je vždy tabulka zobrazující v procentech přehledně výsledky jednotlivých zkoumaných vzorků ze skupiny. Procentuální výsledek zobrazený v tabulce vyjadřuje četnost, kolikrát respondenti zvolili daný stupeň sledované škály. Vzorky jsou seřazeny vertikálně a rozřazeny dle posuzované škály, abychom mohli vzorky z dané skupiny mezi sebou i navzájem porovnat.

Jak bylo nastíněno v kapitole 6.3., pokud se polarita odpovědi pohybovala k jedné, nebo druhé straně, dotazovaný vzorek byl pochopen a výsledek je konkrétní. Pokud se výsledky respondentů rozložili po grafu rovnoměrně, výsledek je nekonkrétní a došlo k nepochopení zadání nebo chybě v poslechovém testu.

U každé skupiny vzorků je přiložen i graf, který znázorňuje daný předpoklad pro jednotlivé vzorky a aritmetickým průměrem zobrazené reálné odpovědi. Můžeme tak sledovat míru odchylky odpovědi proti předem určenému teoretickému předpokladu. Pokud byl výsledek respondentů v intervalu  $\langle 3,5 ; 4,5 \rangle$ , je možné hovořit o neutrálním hodnocení. Posuzovaný vjem daného problému se tak nepřiklání ani k jednomu z pólů.

Poslední část vyhodnocení se bude věnovat rozporům samotného výzkumu. Zde se bude zkoumat, jestli poslechový test byl celkově správně chápán a zda u jednotlivých vzorků respondenti hodnotili ty parametry, které se od nich žádali. Zde se bude zkoumat i četnost neutrálního hodnocení u vzorků, nejasných výsledků a jejich možné příčiny.

### 9.1 SKUPINA VZORKŮ, KDE JSOU DOMINANTNÍ SUDÉ, NEBO LICHÉ HARMONICKÉ SLOŽKY

V této skupině se zkoumá vliv převažujících sudých, nebo lichých harmonických složek na subjektivní vjem výšky zvuku. Tato skupina je podrobně popsána v kapitole 7.3.1. V následující tabulce č. 8 se nachází výsledky podle škálování Dunna a Kinga. Vzorky jsou v tabulce rozřazeny podle škál, které se u vzorků hodnotily a jsou dále seřazeny podle pořadí postupně tak, jak byly i v poslechovém testu. Dále je v tabulce č. 9 vyneseno aritmetický průměr odpovědi a jednotlivé předpokládané hodnoty. Tyto výsledky jsou rovněž seřazeny podle posloupnosti, jak se nacházeli v poslechovém testu a podle posuzované škály. Na následující stránce jsou tyto tabulky vyneseny do grafů (viz obr. č. 36, a obr. č. 37.)

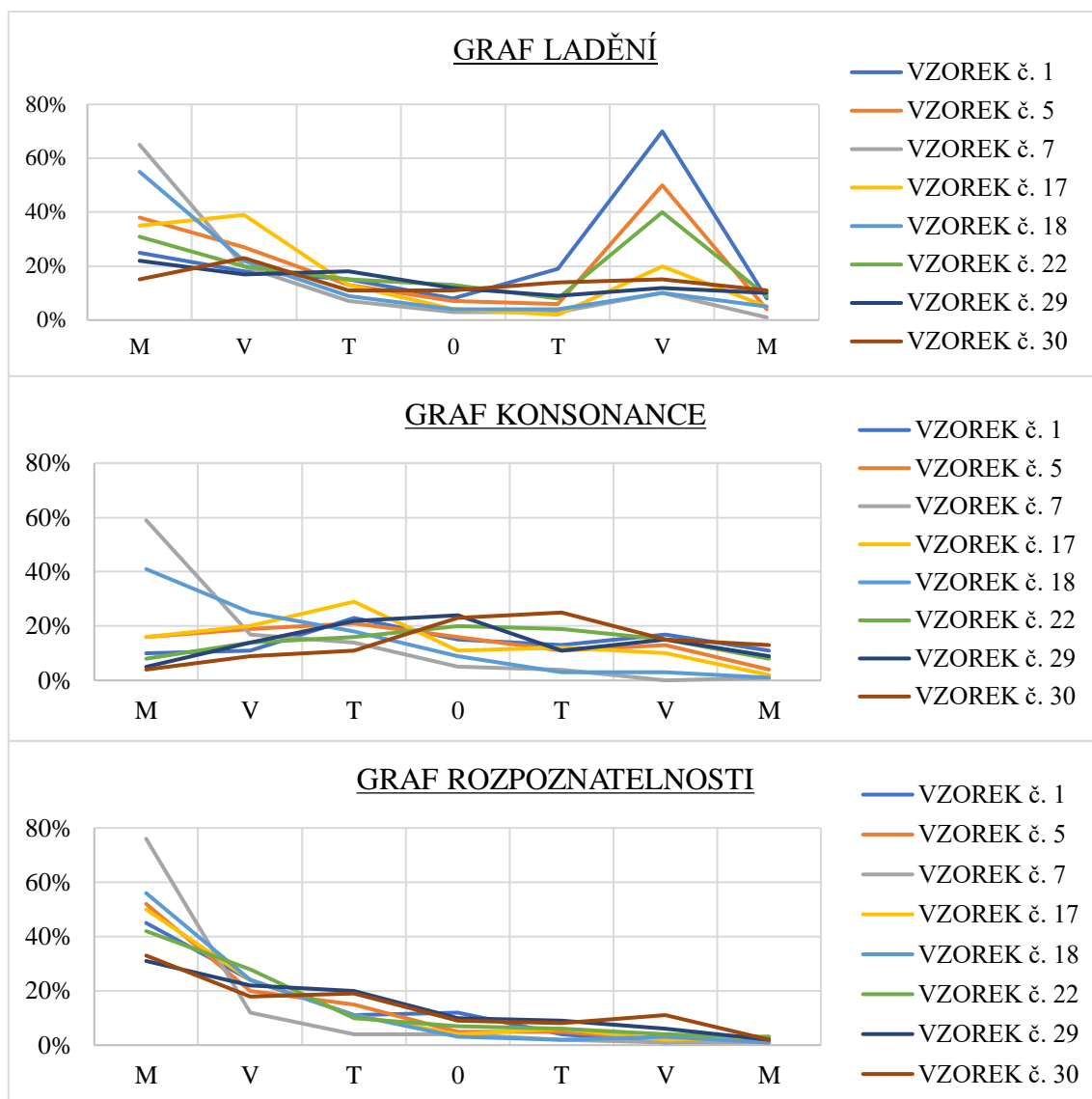


		1	2	3	4	5	6	7	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
1	LADÍ	25	18	15	8	19	70	8	NELADÍ
5		38	27	13	7	6	50	4	
7		65	20	7	3	3	10	1	
17		35	39	13	4	2	20	5	
18		55	22	9	4	4	10	5	
22		31	20	15	13	8	40	9	
29		22	17	18	12	9	12	10	
30		15	23	11	11	14	15	11	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
1	KONSONANTNÍ BRAVA	10	11	23	15	13	17	11	DISONANTNÍ BARVA
5		16	19	21	16	11	13	4	
7		59	17	14	5	4	0	1	
17		16	20	29	11	12	10	2	
18		41	25	18	9	3	3	1	
22		8	14	16	20	19	15	8	
29		5	14	22	24	11	15	9	
30		4	9	11	23	25	15	13	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
1	LEHCE ROZPOZNATELNÉ	45	24	11	12	4	1	3	TĚŽCE ROZPOZNATELNÉ
5		52	20	15	5	5	2	1	
7		76	12	4	4	2	1	1	
17		50	24	11	4	6	2	3	
18		56	24	11	3	2	3	1	
22		42	28	10	7	6	4	3	
29		31	22	20	10	9	6	2	
30		33	18	19	9	8	11	2	

**Tabulka 8 – Hodnocení 1. skupiny vzorků v %**

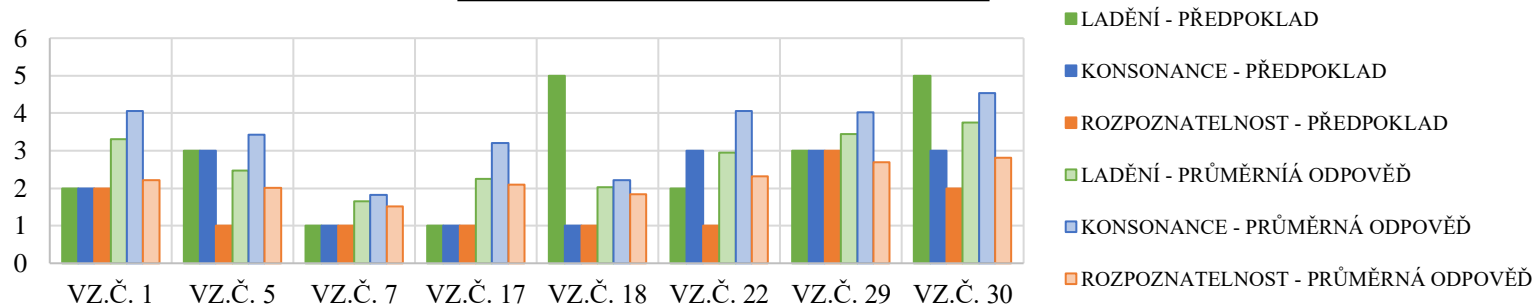
		VZ.Č. 1	VZ.Č. 5	VZ.Č. 7	VZ.Č. 17	VZ.Č. 18	VZ.Č. 22	VZ.Č. 29	VZ.Č. 30
LADĚNÍ	PŘEDPOKLAD	2	3	1	1	5	2	3	5
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	3,31	2,47	1,66	2,25	2,03	2,95	3,45	3,75
KONSONANCE	PŘEDPOKLAD	2	3	1	1	1	3	3	3
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	4,05	3,42	1,82	3,21	2,21	4,05	4,03	4,53
ROZPOZNATELNOST	PŘEDPOKLAD	2	1	1	1	1	1	3	2
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	2,21	2,01	1,51	2,1	1,84	2,31	2,7	2,82

**Tabulka 9 – Odpovědi dotazníku 1. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem**



**Obrázek 36** – Grafy vyhodnocení 1. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga

### ARITMETICKÝ PRŮMĚR ODPOVĚDÍ



**Obrázek 37** – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů 1. skupiny vzorků

V této skupině si můžeme povšimnout z výsledků na grafech a tabulkách, že jednotlivé odpovědi zcela nenaplnili vždy předpoklad. Nejvíce problematická byla škála konsonance a nejvíce úspěšná byla škála rozpoznatelnosti. Pokud si výsledky rozebereme jednotlivě podle škálování Dunna a Kinga, tak měření proběhlo úspěšně a respondenti se dokázali polarizovat na většině ukázek. Z aritmetických průměrů následně můžeme jasněji odhalit nejasné výsledky.

Na škále, která hodnotila míru ladění, se podle škálování Dunna a Kinga u 1. vzorku nejvíce respondenti přikláněli k výsledku „Velmi“ neladící. Tato odpověď potvrdila a překročila předpoklad, že zvuk obsahující liché složky, byť je naladěný bude působit rozladěně. Tento jev potvrdil i vzorek č. 22 (sampl klarinetu – ladící), kde se respondenti rovněž přikláněli k výsledku „Velmi“ neladící. Sudé harmonické složky rovněž potvrdili v této škále předpoklad, že budou znít více jako ladící. U vzorku č. 7 (syntéza sudých harmonických složek – ladící) se 65% shodlo na „Mimořádně“ ladící a u vzorku č. 18 (syntéza sudých harmonických složek – silně rozladěná o 15 centů) se shodlo celých 55% respondentů že ji rovněž vnímá jako „Mimořádně“ ladící“.

Při hodnocení míry konsonantní barvy se respondenti nejméně shodli a nastalo nejvíce nejasných výsledků. U vzorku č. 1, č. 22 a č. 29 se nacházeli v průměru odpovědi v intervalu  $<3,5 ; 4,5>$ . To mluví o nerozhodném výsledku a vzorek č. 5 a č. 30 se od tohoto intervalu lišil o méně než 0,08 bodu. Konkrétní výsledky tak vyšli v této škále jen u vzorku č. 7, č. 17 a č. 18. Jediný vzorek který naplnil předpoklad v této škále byl vzorek č. 7 který respondenti označili za konsonantní.

V poslední škále, ve které se hodnotila rozpoznatelnost, se respondenti nejvíce blížili předpokladům. Celkový předpoklad byl, že se budou všechny vzorky lehce rozpoznávat. Tato polarita odpovědi je jasně vidět i na grafu kde je vynesena podle škálování Dunna a Kinga. Z dotazovaných uchazečů se žádná odpověď neodchylovala od předpokladu o více jak 1,5 bodu.

Z těchto výsledků můžeme tedy jasně poukázat na celkové splnění předpokladu u vnímání ladění vzorků s lichými, či sudými složkami. Stejně tak se nám podařilo potvrdit výsledek u rozpoznatelnosti, kde se žádný ze vzorků nenacházel v neutrálním, nejasném výsledku.

## 9.2 SKUPINA VZORKŮ, KTERÉ VZNIKLY KOMBINACÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH SLOŽEK V PRVNÍM PÁSMU

U této skupiny vzorků se zkoumá vliv kombinací vyšších harmonických složek v prvním pásmu na celkový vjem výšky. Tato skupina je podrobně popsána v kapitole 7.3.2. a v následující tabulce č. 10 se nachází výsledky podle škálování Dunna a Kinga. Vzorky jsou v tabulce rovněž rozřazeny podle škál a posloupnosti ve které se nacházely v poslechovém testu. Na následující stránce se nachází vynesena aritmetický průměr odpovědi a jednotlivé předpoklady rozřazen v tabulce č. 11.

		1	2	3	4	5	6	7	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
3	LADÍ	57	24	7	3	4	2	3	NELADÍ
6		42	35	7	5	3	6	2	
9		49	28	10	3	4	4	2	
12		29	30	17	14	4	2	4	
16		39	20	13	8	6	8	6	
20		54	19	12	5	5	3	2	
23		33	31	16	5	10	4	1	
24		27	28	11	16	11	4	3	
34		55	25	7	7	2	2	2	
35		45	22	10	7	12	2	2	
40		14	36	18	18	6	6	2	
44		27	27	21	11	6	4	4	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
3	KONSONANTNÍ BRAVA	33	33	10	10	8	4	2	DISONANTNÍ BARVA
6		23	28	25	12	6	3	3	
9		27	23	21	12	10	5	2	
12		13	19	29	15	14	9	1	
16		22	21	16	20	8	9	4	
20		34	27	24	8	3	2	2	
23		22	19	23	14	15	7	0	
24		13	22	26	20	15	2	2	
34		32	28	19	11	3	6	1	
35		29	28	18	13	7	5	0	
40		16	24	16	17	16	9	2	
44		22	24	24	11	12	4	3	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
3	LEHCE ROZPOZNATELNÉ	69	18	10	0	2	0	1	TĚŽCE ROZPOZNATELNÉ
6		61	23	7	3	2	3	1	
9		63	15	10	6	1	3	2	
12		50	20	15	2	9	2	2	
16		47	21	18	9	3	0	2	
20		60	18	7	9	2	2	2	
23		51	18	16	8	3	3	1	
24		46	21	12	13	6	1	1	
34		59	20	13	5	2	0	1	
35		54	17	12	11	2	3	1	
40		44	22	15	7	9	1	2	
44		54	21	10	6	2	5	2	

*Tabulka 10 – Hodnocení 2. skupiny vzorků v %*

		VZ.Č. 3	VZ.Č. 6	VZ.Č. 9	VZ.Č. 12	VZ.Č. 16	VZ.Č. 20	VZ.Č. 23	VZ.Č. 24	VZ.Č. 34	VZ.Č. 35	VZ.Č. 40	VZ.Č. 44
LADĚNÍ	PŘEDPOKLAD	5	5	1	2	5	1	5	3	1	5	5	5
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	1,91	2,18	2,05	2,56	2,7	2,05	2,44	2,8	1,9	2,33	2,92	2,7
KONSONANCE	PŘEDPOKLAD	3	3	3	3	2	3	5	3	1	2	3	5
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	2,47	2,71	2,78	3,29	3,14	2,33	3,02	3,16	2,47	2,56	3,28	2,91
ROZPOZNATELNOST	PŘEDPOKLAD	2	2	3	3	1	2	3	3	1	2	3	3
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	1,52	1,75	1,84	2,14	2,08	1,89	2,07	2,19	1,75	2,03	2,26	2,04

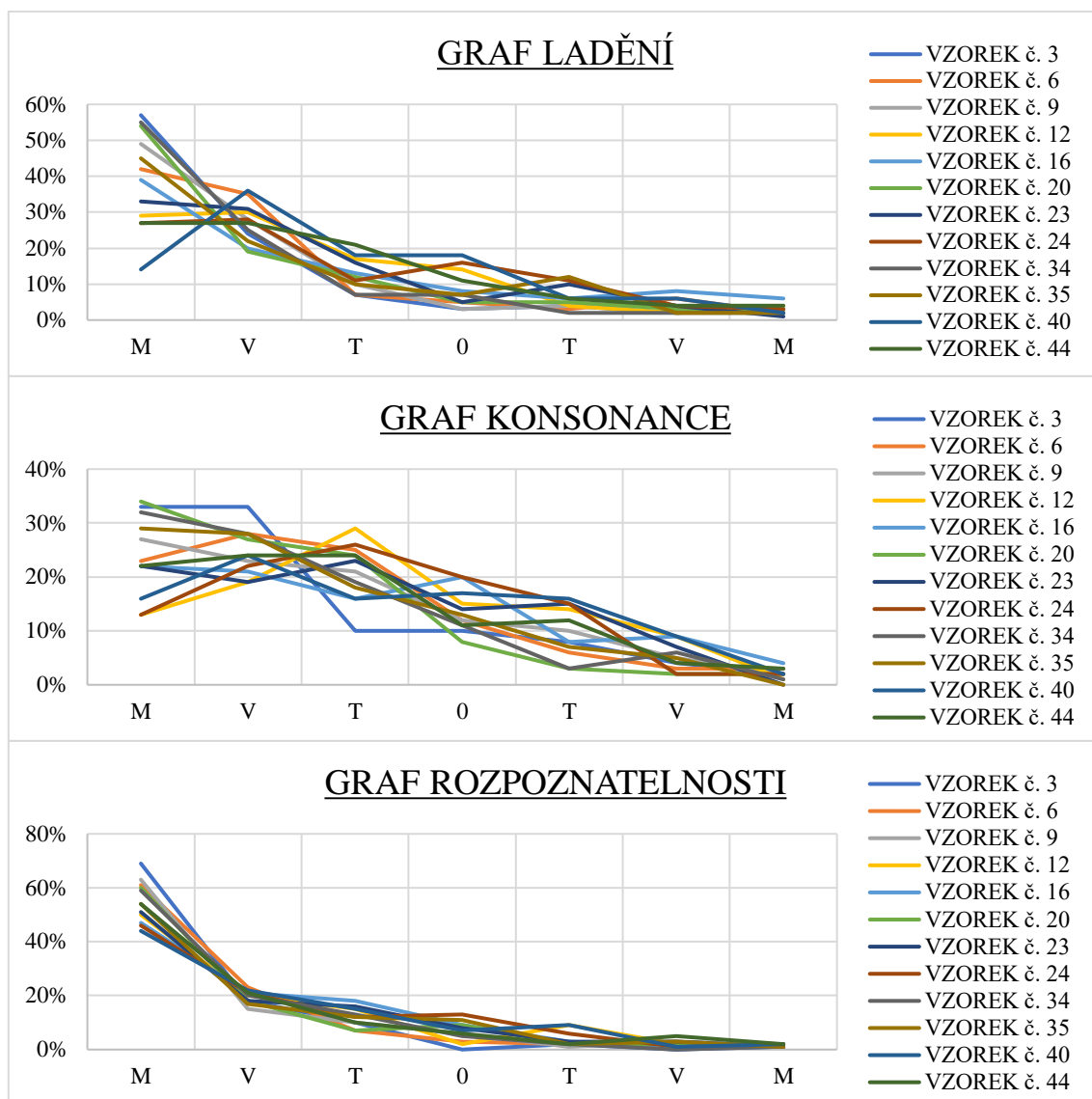
*Tabulka 11 – Odpovědi dotazníku 2. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem*

Na následující stránce jsou vidět do grafů vynesené výsledky z tabulek výsledků jednotlivých škál rovněž podle škálování Dunna a Kinga. Už v předchozích dvou tabulkách jsou vidět jasné výsledky této skupiny. Můžeme tak vidět už v tabulce aritmetického průměru odpovědí, že nejvíce odlišné výsledky od předpokladů přinesla škála hodnotící ladění.

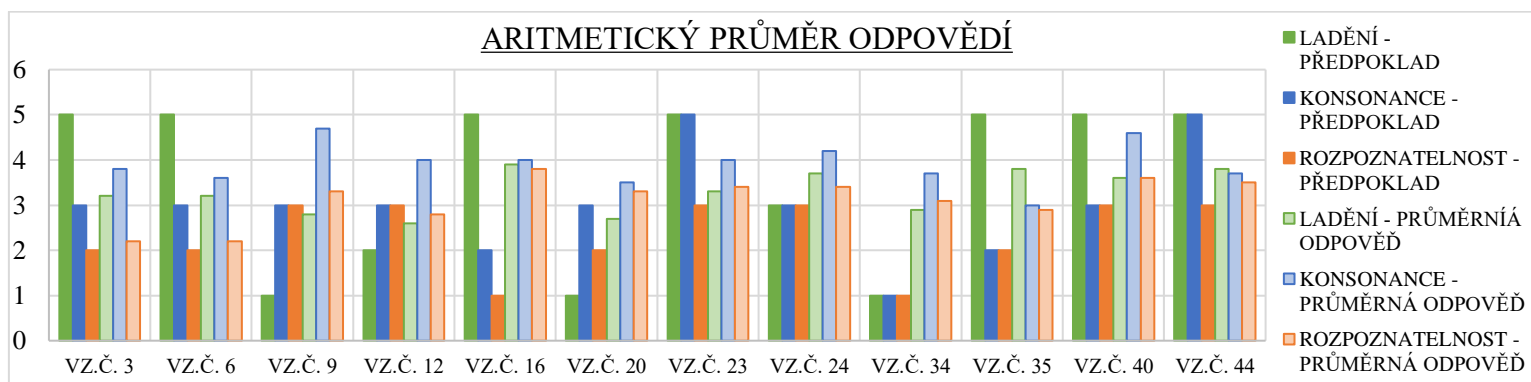
Na této škále se ukázalo, že i když byl předpoklad „Mimořádně neladící“ tak respondenti se klonili k výsledku „Velmi ladící“. U Vzorků č. 3, č. 6, č. 16, č. 23, č. 35 a č. 40 se rozmezí odchylky od predikovaného výsledku pohybovalo v intervalu mezi 2,1 a 3,1 body. Nejvíce se odchýlil výsledek u vzorku č. 3 (syntéza v kombinaci s přidanou 6 harmonickou – rozladěná o 9 centů). U tohoto vzorku se předpokládalo díky posílené oktávové složce o velmi konsonantní a jasný vjem ale výsledky se shodovali na přesném opaku. Nejvíce se pak shodoval výsledek u vzorku č. 34, kde výsledek se předpokládal konsonantní a odchylka průměrného výsledku byla 0,9 bodu.

Na druhé hodnocené škále jsme mohli sledovat poměrně vyrovnaný od 2,33 bodu do 3,29 bodu. Respondenti se tak shodli na tom, že toto složení zvuků vnímají obecně jako „Trochu“ až „Velmi“ konsonantní a nezáleží na míře rozladění vzorku. V této škále se nejvíce odchýlil výsledek vzorku č. 44 (syntéza v kombinaci s přidanou 5 harmonickou – rozladěná o 9 centů), u kterého byla predikce výsledku „Velmi“ nekonsonantní a reálný výsledek byl „Trochu“ konsonantní. U tohoto vzorku se předpokládalo, že přidaná 5. harmonická složka přidá disonantní charakter a zvonivost vzorku. Tento předpoklad se nám tedy vyvrátil. Ukázalo se tak, že vytvořené vnitřní diferenční tóny nebudou mít tak kritický vliv konsonantní, nebo disonantní barvu daného zvuku v tomto případě.

U poslední škály, která hodnotila rozpoznatelnost jednotlivých vzorků, si můžeme všimnout na grafech opět jasné polarizace výsledku. Respondenti hodnotili celkově tuto skupinu vzorků jako lehce rozpoznatelnou. Nejvíce se výsledek přiblížil u vzorku č. 35 (syntéza v kombinaci s přidanou 3 harmonickou – rozladěná o 9 centů), kde se aritmetický průměr odpovědí lišil se předpokladem o pouhých 0,03 bodu. Další v pořadí byli vzorky č. 6 (syntéza v kombinaci s přidanou 3 harmonickou – rozladěná o 15 centů) a č. 20 (syntéza v kombinaci s přidanou 3 harmonickou – naladěná). Můžeme tedy z tohoto výsledku konstatovat, že nejlépe se rozpoznávali vzorky syntézy s přidanou 3. harmonickou složkou. U tohoto výsledku to bylo i očekávané, díky diferenčním tónům, které dvakrát zesílili vjem fundamentu, jednou přidali interval tercie a jednou oktávy. Skupina vzorků s přidanou 3. harmonickou složkou tedy naplnila svůj předpoklad nejvíce ze všech skupin.



**Obrázek 38** – Grafy vyhodnocení 2. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga



**Obrázek 39** – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů 2. skupiny vzorků

### 9.3 SKUPINA VZORKŮ NÁSTROJŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICITA UPRAVENÝMI FORMANTOVÝMI OBLASTMI

V této skupině vzorků se zkoumá vliv deformace formantových oblastí a různá míra inharmonicit ve spektru na celkový vjem výšky. Podrobný popis této skupiny se najde v kapitole 7.3.3. V následující tabulce č. 12 a č. 13 se opět nachází výsledky podle škálování Dunna a Kinga a tabulka průměrných odpovědí vůči předpokladu. Vzorky jsou rovněž v tabulce seřazeny podle škál a posloupnosti, ve které se nacházely v poslechovém testu.

		1	2	3	4	5	6	7	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
4	LADÍ	18	19	16	18	12	8	9	NELADÍ
13		7	22	15	16	11	13	16	
15		12	22	13	12	15	15	11	
19		20	24	18	8	9	9	12	
25		39	13	19	3	4	5	17	
28		8	14	20	13	10	16	19	
32		25	16	21	8	4	11	15	
36		30	27	19	9	3	7	5	
41		31	13	25	12	3	3	13	
42		34	27	16	5	4	7	7	
45		20	19	21	8	10	5	17	
46		32	37	15	3	3	6	4	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
4	KONSONANTNÍ BRAVA	9	16	27	19	10	11	8	DISONANTNÍ BARVA
13		11	13	13	14	20	10	19	
15		5	13	18	17	23	10	14	
19		10	14	13	19	15	15	14	
25		18	16	12	11	9	6	28	
28		7	19	17	15	11	13	18	
32		11	13	18	14	13	10	21	
36		11	23	17	19	17	9	4	
41		9	20	13	9	18	9	22	
42		17	17	14	17	10	19	6	
45		11	15	16	13	14	10	21	
46		17	19	16	9	16	19	4	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
4	LEHCE ROZPOZNATELNÉ	31	23	18	9	8	7	4	TĚŽCE ROZPOZNATELNÉ
13		36	11	19	11	6	11	6	
15		32	17	13	13	11	11	3	
19		41	20	19	7	4	6	3	
25		38	25	6	1	6	15	9	
28		32	18	24	6	8	6	6	
32		43	13	12	6	9	12	5	
36		42	22	15	5	7	5	4	
41		38	18	13	8	6	9	8	
42		46	23	9	11	3	4	4	
45		35	17	15	6	7	9	11	
46		45	27	13	9	1	3	2	

*Tabulka 12 – Hodnocení 3. skupiny vzorků v %*

		VZ.Č. 4	VZ.Č. 13	VZ.Č. 15	VZ.Č. 19	VZ.Č. 25	VZ.Č. 28	VZ.Č. 32	VZ.Č. 36	VZ.Č. 41	VZ.Č. 42	VZ.Č. 45	VZ.Č. 46
LADĚNÍ	PŘEDPOKLAD	1	5	3	3	2	1	5	1	2	3	6	1
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	3,47	4,05	3,85	3,37	3,03	4,27	3,43	2,69	3,04	2,67	3,52	2,42
KONSONANCE	PŘEDPOKLAD	3	3	3	3	5	3	6	2	5	3	3	2
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	3,7	4,25	4,26	4,16	4,07	4,15	4,19	3,51	4,22	3,67	4,18	3,61
ROZPOZNATELNOST	PŘEDPOKLAD	5	5	5	1	6	3	5	1	6	3	6	3
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	2,77	2,97	2,99	2,43	2,93	2,82	2,81	2,44	2,85	2,3	3,04	2,11

**Tabulka 13** – Odpovědi dotazníku 3. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem

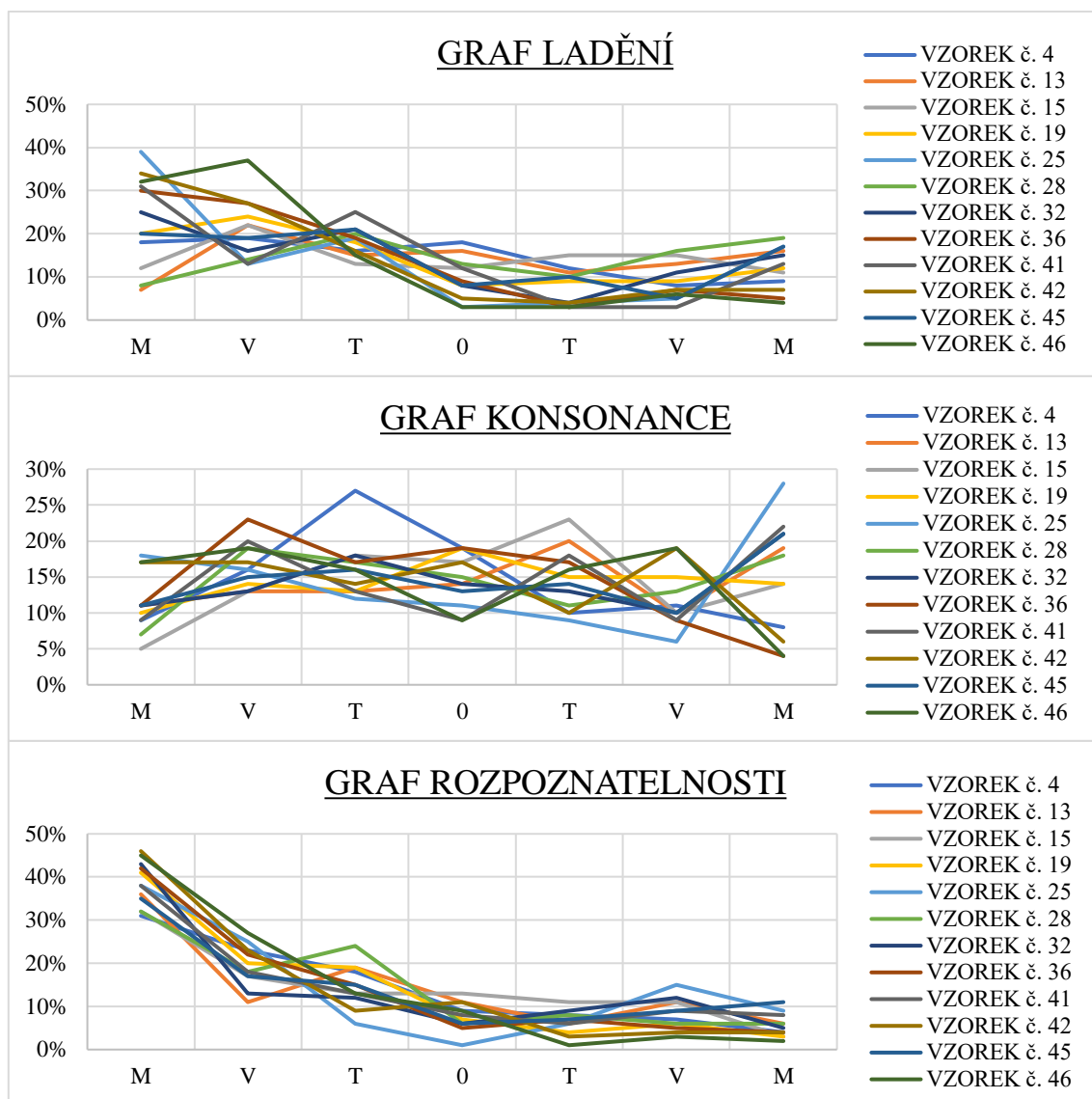
Na další stránce jsou vidět do grafů vynesené výsledky z tabulek č. 12 a č. 13 (viz obr. č. 40 a obr. č. 41). Při pohledu na tyto grafy vidíme, že největší problém této skupiny byla škála hodnotící míru konsonantní, či disonantní barvy zkoumaného zvuku. Celkově tak při pohledu na všechny grafy můžeme i říct že předpoklady v této skupině nebyl rovněž zcela naplněny.

Na škále hodnocení míry ladění se podařil získat poměrně polarizovaný výsledek na kladnou stranu. Obecně se u této skupiny očekávalo opačné hodnocení v rámci různé míry inharmonicit ve spektru. Nejvíce se od předpokladu odchýlil výsledek vzorku **č. 28**: (sampl nástroje zvon, s upravenou formantovou oblastí u 13 – 16 harmonické složce – naladěný). U tohoto vzorku se předpokládalo, že jej budou vnímat jako „Mimořádně“ ladící. V grafickém vyobrazení se odpovědi rozprostřeli po celém grafu poměrně rovnoměrně a průměrná odpověď se tak dostala do nejasného, neutrálního výsledku. Předpoklad se naopak potvrdil v této skupině u vzorků **č. 19** (sampl nástroje akordeon s upravenou formantovou oblastí u 9 – 12 harmonické složky – rozladěný o 9 centů), vzorku **č. 25** (sampl nástroje agogo s upravenou formantovou oblastí u 9 – 12 harmonické složky – naladěný), vzorku **č. 41** (sampl nástroje agogo s upravenou formantovou oblastí u 13 – 16 harmonické složky – naladěný) a vzorku **č. 42** (sampl nástroje akordeon s upravenou formantovou oblastí u 13 – 16 harmonické složky – rozladěný o 9 centů). U těchto vzorků byla průměrná odchylka od predikovaného výsledku nejvíce o 1 bod.

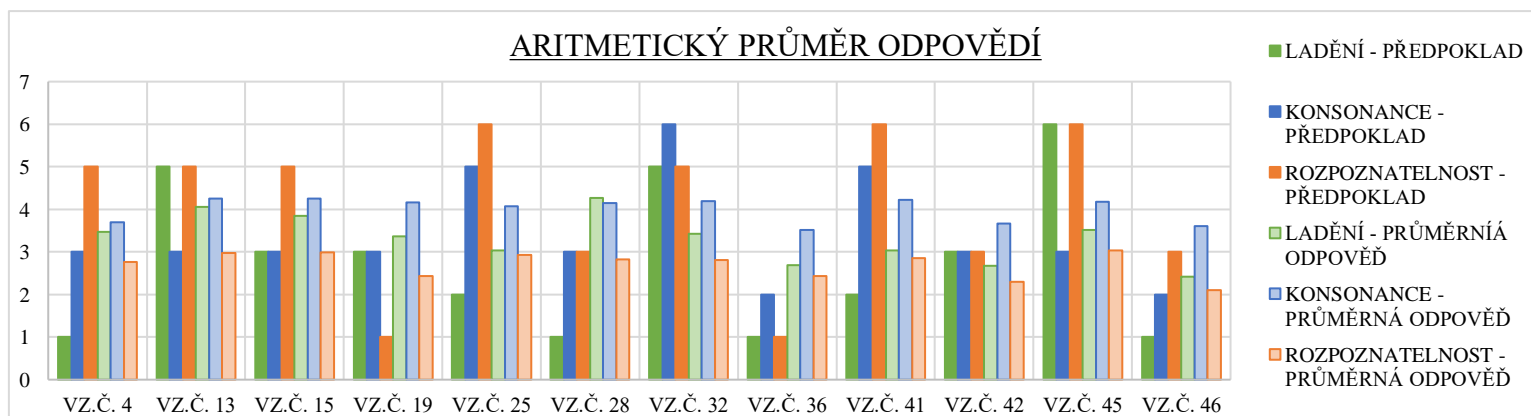
Druhá škála, jak už bylo nastíněno, byla nejvíce problematická. Zde se výsledky jednotlivých vzorků nacházeli všechny v neutrální hodnocení v intervalu průměrného výsledku  $<3,5 ; 4,5>$  bodu což znamená že výsledky byli na grafu rovnoměrně rozloženy a nepolarizovali se ani k jedné straně.

Na poslední škále hodnotící rozpoznatelnost jednotlivých vzorků nás opět čekal poměrně jasně polarizovaný výsledek na kladnou stranu grafu a ani jeden vzorek zde nebyl hodnocen neutrálně. V této škále se ukázalo, že ačkoliv byl předpoklad, že vzorky se střední, nebo vyšší mírou inharmonicit budou hůře rozpoznatelné, tak respondenti tyto vzorky vnímali jako lépe rozpoznatelné, bez predikované závislosti míry inharmonicit ve zkoumaných vzorcích.





**Obrázek 40** – Grafy vyhodnocení 3. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga



**Obrázek 41** – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů 3. skupiny vzorků

## 9.4 SKUPINA VZORKŮ S RŮZNOU MÍROU INHARMONICIT, RUCHOVÝMI SLOŽKAMI A ŠUMEM

U této skupiny vzorků se zkoumá vliv různé míry inharmonicit, ruchů a šumu na celkový vjem výšky zvuku. Tato skupina je podrobně popsána v kapitole 7.3.4. Do následující tabulky č. 14 jsou vepsány jednotlivé výsledky podle škálování Dunna a Kinga. Vzorky jsou v tabulce stejně rozřazeny jako u předchozích kapitol, tzn. podle škál a posloupnosti ve které se nacházely v poslechovém testu. Na následující stránce se nachází v tabulce č.15 aritmetický průměr odpovědí a jednotlivé předpoklady seřazeny stejně, jako u předchozích kapitol vyhodnocení.

		1	2	3	4	5	6	7	
Č. VZORKU		M	V	T	0	T	V	M	
2	LADÍ	2	4	2	5	6	18	63	NELADÍ
8		44	23	16	8	1	5	3	
10		34	17	8	5	5	9	22	
11		44	22	16	3	10	4	1	
14		0	3	3	1	5	13	75	
21		32	32	16	9	3	6	2	
26		32	26	16	7	6	8	5	
27		19	26	15	14	11	12	3	
31		29	16	12	6	7	8	22	
33		0	2	2	8	3	15	70	
37		29	18	9	8	10	7	19	
38		32	28	17	7	10	1	5	
39		26	30	18	7	8	7	4	
43		41	28	11	8	6	4	2	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
2	KONSONANTNÍ BRAVA	0	1	5	8	11	22	53	DISONANTNÍ BARVA
8		26	26	24	17	6	0	1	
10		6	7	4	8	16	15	44	
11		20	17	30	14	12	3	4	
14		0	3	5	5	7	23	57	
21		17	27	28	17	5	4	2	
26		15	18	18	24	11	8	6	
27		12	22	26	11	13	9	7	
31		7	7	6	9	9	13	49	
33		0	3	4	8	12	18	55	
37		7	7	8	11	10	17	40	
38		18	22	22	22	7	7	2	
39		19	23	24	18	9	6	1	
43		27	19	25	13	11	4	1	
Č. VZORKU		M (%)	V (%)	T (%)	0 (%)	T (%)	V (%)	M (%)	
2	LEHCE ROZPOZNATELNÉ	42	12	6	4	7	16	13	TĚŽCE ROZPOZNATELNÉ
8		55	18	15	5	2	4	1	
10		34	7	9	5	9	14	22	
11		52	21	7	12	4	3	1	
14		47	8	7	7	11	5	17	
21		50	25	11	4	6	3	1	
26		45	26	7	7	8	4	3	
27		42	22	17	8	6	4	1	
31		25	14	6	12	4	10	29	
33		40	18	10	7	4	4	17	
37		35	6	12	7	6	14	20	
38		52	20	11	6	6	2	3	
39		43	26	12	6	5	4	3	
43		49	21	22	4	2	1	1	

*Tabulka 14 – Hodnocení 4. skupiny vzorků v %*

		VZ.Č. 2	VZ.Č. 8	VZ.Č. 10	VZ.Č. 11	VZ.Č. 14	VZ.Č. 21	VZ.Č. 26	VZ.Č. 27	VZ.Č. 31	VZ.Č. 33	VZ.Č. 37	VZ.Č. 38	VZ.Č. 39	VZ.Č. 43
LADĚNÍ	PŘEDPOKLAD	7	2	3	2	3	6	5	5	2	5	5	2	3	1
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	6,15	2,26	3,45	2,29	6,47	2,45	2,73	3,2	3,58	6,37	3,49	2,58	2,78	2,3
KONSONANCE	PŘEDPOKLAD	7	5	2	5	7	5	5	6	2	7	2	5	5	5
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	6,07	2,55	5,42	3,06	6,13	2,86	3,46	3,46	5,41	6,03	5,21	3,07	2,97	2,78
ROZPOZNATELNOST	PŘEDPOKLAD	7	3	6	3	7	3	3	5	6	7	6	3	3	3
	PRŮMĚRNÁ ODPOVĚĎ	3,22	1,97	3,78	2,08	3,1	2,04	2,31	3,46	4,02	2,97	3,65	2,12	2,25	1,96

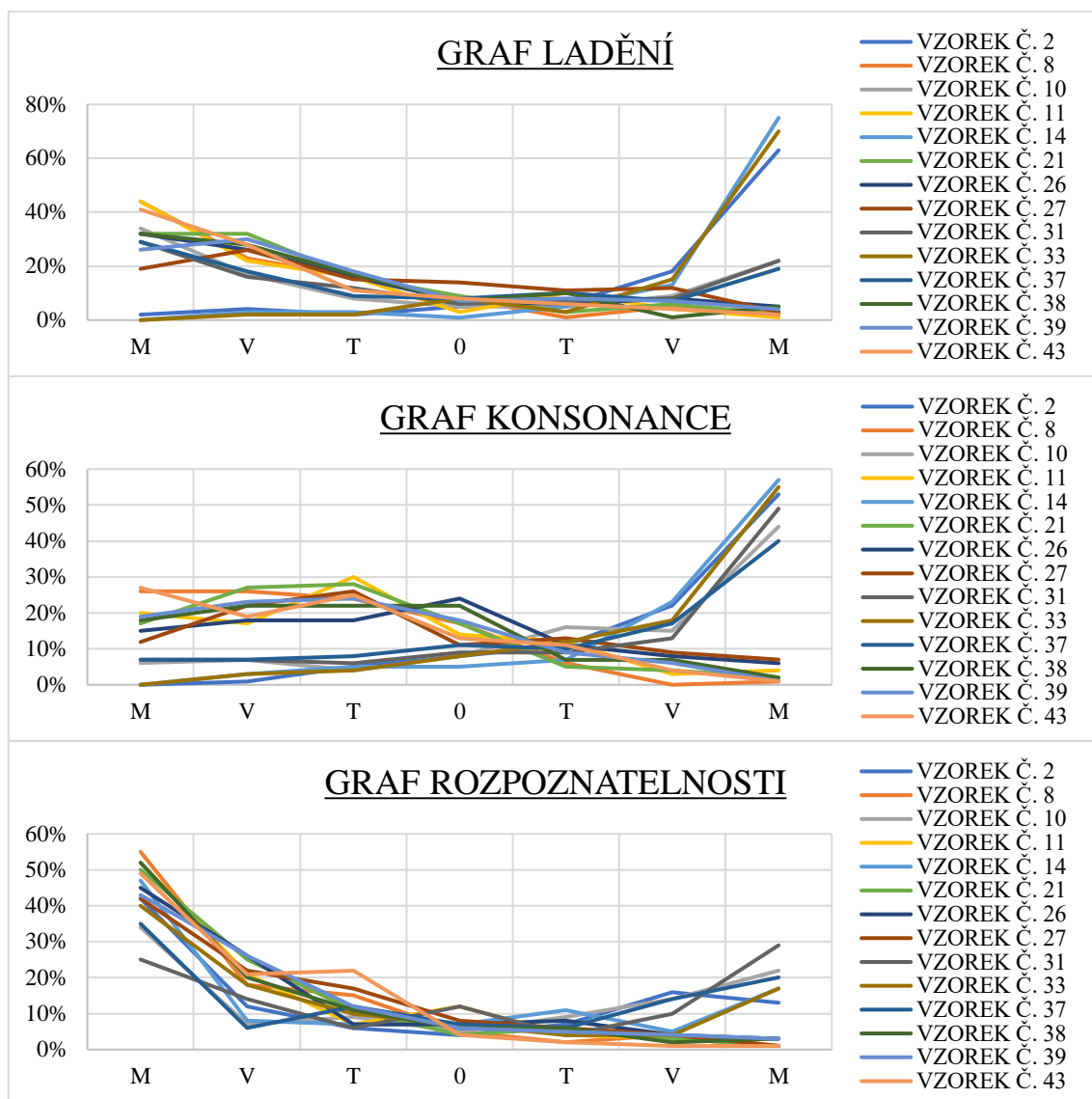
**Tabulka 15** – Odpovědi dotazníku 4. skupiny vzorků vynesené aritmetickým průměrem

Na další stránce jsou rovněž vidět vynesené výsledky z tabulek č. 14 a č. 15 do grafů (viz obr. č. 42 a obr. č. 43). V těchto grafech lze vyčíst že zkoumané zvukové vzorky nenásledovali jeden trend odpovědi ale stále byla zachována polarita výsledků u jednotlivých zkoumaných vzorků. Neutrální, nejasný výsledek se u tohoto měření vyskytl minimálně.

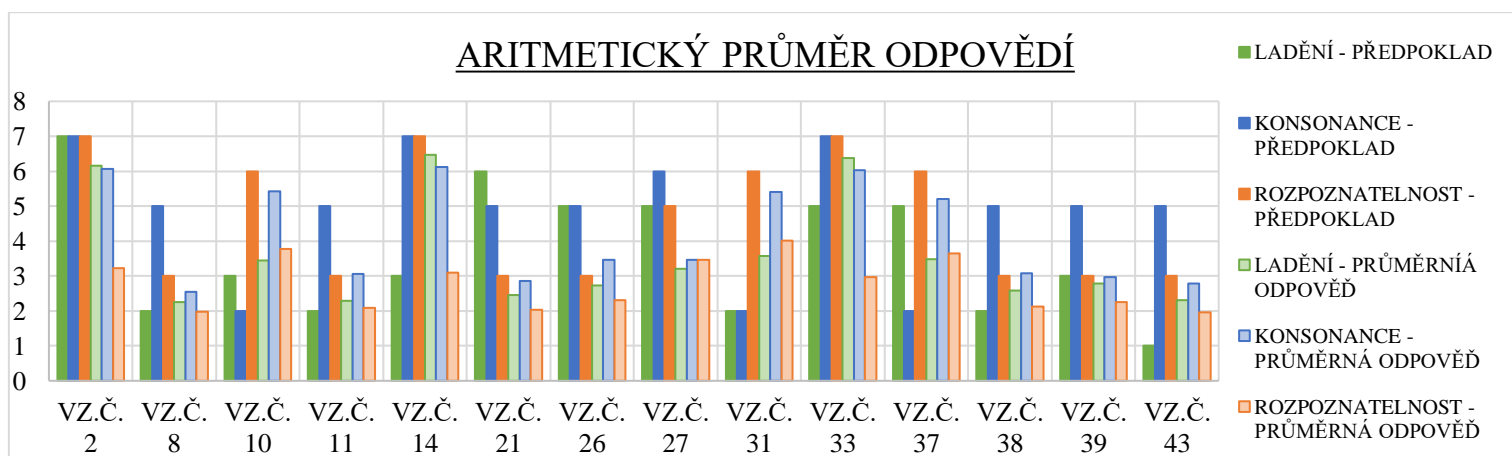
Na škále rozpoznatelnosti jsme si mohli všimnout, naplněného předpokladu u většiny zkoumaných vzorků. Vzorky které se lišily od předpokladů více jak o 2,3 bodu byly: **č. 14** (syntéza se shluky u 1., 3. a 5. harmonické složky a ruchovou složkou – naladěné), **č. 21** (syntéza se 6 harmonickými složkami, ve které 4., 6. a 8. harmonická je rozladěná – rozladěné o 15 centů), **č. 26** (syntéza se 6 harmonickými složkami, ve které 1., 2. a 3. harmonická je rozladěná – rozladěné o 9 centů). U vzorku **č. 14**, i když byl naladěný, tak byl vnímán jako „Mimořádně“ neladící. U vzorku **č. 21** a **č. 26**, se prokázal opak. I když tento vzorek byl „Mimořádně“ neladící, byl vnímán jako „Velmi“ ladící. Naproti tomu vzorek **č. 10**, **č. 31** a **č. 37** se v průměru odpovědi ocitl na krajní mezi s neutrálním, nejasným výsledkem.

Na škále hodnotící konsonantní, či disonantní barvu jsme si mohli všimnout že výsledky se ve většině neshodovali s předpoklady a ukazovali přesně opačné hodnoty. Pokud jsme se na tyto hodnoty zaměřili více, mohli jsme si dokonce všimnout, že většina výsledků kopíruje jen s malou odchylkou výsledky z první škály. Tento jev mohl být zapříčiněn celkovou povahou zvukových vzorků. Na této škále se ani jeden vzorek nenacházel v průměru odpovědi v intervalu <3,5 ; 4,5> a díky tomu zde nenastal ani jeden nejasný výsledek. U vzorků **č. 8**, **č. 10**, **č. 27**, **č. 31** a **č. 37** se odpovědi lišily o více jak 2,5 bodu. Z výsledků lze také říci, že vzorky **č. 2**, **č. 10**, **č. 14**, **č. 31**, **č. 33** a **č. 37** byly vnímány jako „Velmi“ disonantní a vzorky **č. 8**, **č. 11**, **č. 21**, **č. 26**, **č. 27**, **č. 38**, **č. 39** a **č. 43** byly vnímány jako „Trochu“ konsonantní.

Na poslední škále vyšli 3 neutrální, nejasné výsledky, a to u vzorku **č. 10**, **č. 31** a **č. 37** (syntéza se 3 harmonickými složkami a šumem). Zbylých 11 vzorků se přiklápělo jasně na kladnou stranu grafu. Největší rozdíl mezi předpokladem a výsledkem byl u vzorku **č. 2**, **č. 14** a **č. 33** (syntézy se shluky u 1., 3. a 5. harmonické složky a ruchovou složkou). U těchto vzorků byla předpokládána „Mimořádně“ těžká rozpoznatelnost a respondenti tyto vzorky označili jako „Trochu“ lehce rozpoznatelné.



**Obrázek 42** – Grafy vyhodnocení 4. skupiny vzorků podle škálování Dunna a Kinga



**Obrázek 43** – Graf průměrných odpovědí vs předpokladů 4. skupiny vzorků

## 9.5 ROZPORY PŘI VÝZKUMU

Při tomto výzkumu nastalo hned několik obtíží. Mezi největší z nich patřil vývoj koronavirové epidemie a platných epidemiologických nařízeních, které znemožňovali za respondenty osobně přijít, vysvětlit účel a průběh výzkumu a zajistit stejné podmínky všem respondentům. Právě faktor stejných podmínek (tzn. kalibrovaná sluchátka, osobní vysvětlení všech částí výzkumu), vnímám jako zásadní, neboť některé nejasné, neutrální odpovědi mohli vzniknout díky nepochopení zadání, použití nekvalitních poslechových nástrojů apod. Díky využití internetového dotazníku a i přes webovou komunikaci s některými respondenty bohužel nebylo možné zajistit aby podmínky uvedené na začátku dotazníku v návodu byly dodrženy.

Nejasné odpovědi v první skupině vzorků se objevily celkem ve čtyřech případech nejasného, neutrálního hodnocení. Přesněji u vzorků č. 1, č. 22 a č. 29 – u hodnocení konsonance a u vzorku č. 30 u hodnocení ladění. Tyto nejasné výsledky nejsou z celkového pohledu vyhodnocení skupiny zásadní. Mohou být připsány špatnému pochopení zadání v důsledku nemožnosti osobního kontaktu s respondenty. U vzorku č. 30 by se dala neutralita výsledku připsat i široké skupině respondentů v kombinaci s nesplněním podmínek poslechu na kvalitních sluchátkách se zvukovou kartou.

V druhé skupině vzorků, hodnotící kombinaci vyšších harmonických složek v prvním pásmu, se nevyskytl žádný případ neutrálního hodnocení.

Ve třetí skupině vzorků vznikla velká neutralita při hodnocení konsonance. Zde ani jeden vzorek nebyl přikloněn k jednomu, či druhému pólu. Příčina tohoto hodnocení mohla být na této škále špatně vybraným bipolárním adjektivem, jelikož se respondenti nedokázali jasně přiklonit ani k jednomu stupni. U vzorku č. 13, č. 15, č. 28 a č. 45, dokonce došlo k neutrálnímu výsledku u dvou ze tří hodnotících škál. U těchto vzorků mohlo dojít k nejasnému hodnocení v důsledku kombinace nedodržení pokynů ze zadání a širokého spektra respondentů, nebo špatně zvoleným zvukovým vzorkem.

Ve čtvrté skupině vzorků došlo k největší míře neutrálního výsledku na škále rozpoznatelnosti, kde se vyskytli celkem 3 případy. Přesněji u vzorku č. 10, č. 31 a č. 37. U vzorku č. 31 došlo dokonce opět k neutrálnímu výsledku na dvou ze třech hodnotících škálách – u ladění a u rozpoznatelnosti. Nejasné hodnocení v těchto případech mohlo být zapříčiněno špatně zvoleným zvukovým vzorkem, neboť vzorky č. 10, č. 31 a č. 37 jsou ze stejného základu (syntéza se 3 harmonickými složkami a šumem) a každý vzorek je pouze jinou měrou rozladěný.

V následující tabulce č. 16 jsou vyčtena čísla všech vzorků, které ve výzkumu dosáhly neutrálního, nejasného vyhodnocení – tzn. spadaly v aritmetickém průměru do intervalu  $\langle 3,5 ; 4,5 \rangle$ . Vzorky jsou v tabulce seřazeny podle pořadí, jak se nacházely v poslechovém testu a rozřazené dle posuzované škály, ve které se nacházely.

Nejvíce problémová škála byla dle této tabulky škála konsonance, kvůli neutrálnímu výsledku na jedné celé skupině vzorků.

LADĚNÍ	13	15	28	30	31	45										
KONSONANCE	1	4	13	15	19	22	25	28	29	32	36	41	42	45	46	
ROZPOZNATELNOST	10	31	37													

*Tabulka 16 – Výčet všech neutrálních vzorků*

## 10 ZÁVĚR

Tato práce se zaměřila na zkoumání vlivu jednotlivých složek spektra na celkové vnímání výšky zvuku. Díky pilotnímu průzkumu se odhalilo několik nedostatků, které se do hlavního průzkumu podařilo odstranit. Tím se dokázalo poměrně dobře zamezit četným nejasným výsledkům, které se v pilotním průzkumu objevovaly. Na měřítku 100 respondentů se objevila pouze jeden hlavní nedostatek ve 3. zkoumané skupině.

Nejprve jsem v práci popsal základní teoretické poznatky ohledně psychoakustiky, složení harmonického spektra zvuku a signálů. V této části byl popsán podrobně i mechanismu fungování rozdílových tónů a vlivu jednotlivých částí harmonického spektra na vnímání výšky zvuku. Před samotným výzkumem jsem vysvětlil i fungování vybrané psychoakustické metody k měření experimentu. Jak tato metoda sémantického diferenciálu sbírá data a vyhodnocuje. Největší část práce jsem avšak věnoval vysvětlení průběhu samotného výzkumu a vyhodnocování výsledků z poslechového testu.

Díky omezení pohybu občanů v ČR a koronavirové krizi nebyl tento poslechový test zpracován zcela podle ideálních představ a musel se přizpůsobit podmínkám, které byly dány ministerstvem zdravotnictví a vládou ČR. Tyto ztížené podmínky, hlavně nemožnost se s respondenty setkat osobně s kalibrovanými sluchátky, se odrazily v jistých případech nejasného výsledku během vyhodnocení. Naštěstí se nejednalo o takové procento chybných výsledků, aby byla narušena celková validita výzkumu.

Nejvíce problémová byla 3. skupina vzorků u které se celá jedna škála ocitla v nerozhodném, nejasném výsledku. Tato problémová škála mohla být identifikována dříve, pokud by probíhal výzkum při osobním kontaktu s respondenty. Bohužel takto není možné přesně identifikovat, zda problémem v této skupině bylo použité vybavení respondenty při vyplňování dotazníku, samotné vzorky, či špatně pochopená bipolární škála.

Vybraní respondenti byli z různých hudebních okruhů, jak je vidět na obr. č. 15. Toto široké zastoupení z řad různých okruhů hudebníků doplnili i hudební laici. Laického zastoupení bylo 14% z celkového objemu respondentů a dodali testu komplexnější náhled na zkoumanou problematiku. Ukázalo se tak, že některé předpoklady neplatí jen pro profesionální muzikanty, ale jsou přenositelné na širokou veřejnost.

Vyhodnocení dotazníku ukázalo na několik předpokladů, které se potvrdili a na několik předpokladů které se podařilo vyvrátit. Mezi předpoklady, které se podařilo naplnit patří, že zvuk obsahující liché harmonické složky se obecně bude zdát jako neladící a disonantní a zvuk se sudými harmonickými se bude zdát více ladící a konsonantní.

Dále se podařilo vyvrátit předpoklad, že vzniklé diferenční tóny budou mít velký vliv na celkový vjem ladění nebo konsonanci. Vzorky vzniklé kombinací 6 harmonických složek se celkově vnímali jako ladící a konsonantní.

Podařilo se dále zjistit v poslední skupině, že pokud zvuk obsahuje ruchové složky a šum, bude obecně vnímán jako neladící a disonantní. Pokud zvuk bude obsahovat rozladěné barvonosné harmonické složky, bude rovněž vnímán jako neladící a disonantní. Pokud zvuk bude mít rozladěné nosné harmonické složky, bude se o něco hůře ladit, ale nebude vnímán jako disonantní. Jako poslední předpoklad se podařilo

zjistit, že zvuk utvořený ze 4 harmonických složek s rozladěnou 2. harmonickou, nebo 2. a 4. harmonickou se bude vždy poměrně dobře ladit a bude mít konsonantní barvu.

Celkově bych tento výzkum sám hodnotil jako podařený. Překvapil mě výsledek u 2 skupiny vzorků, kde se potvrdil opak předpokladů. Dokázal bych si představit využití výsledků z tohoto výzkumu při kompozici například v elektro akustické hudbě. Výsledek by se dal v určité formě přenést i do práce mixovacího inženýra během úpravy spekter jednotlivých nástrojů a efektů v písni.

# LITERATURA A ZDROJE

- [1] MELKA, Alois. Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 80-7331-043-0
- [2] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8
- [3] SYROVÝ, Václav. Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2014. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-323-4
- [4] OTČENÁŠEK, Zdeněk. O subjektivním hodnocení zvuku. V Praze: Akademie múzických umění, 2008. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-113-1
- [5] GEIST, Bohumil. Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: Muzikus, c2005. ISBN 80-86253-31-7
- [6] REKTORYS, K.: Přehled užití matematiky, SNTL, Prometheus, Praha 2002. ISBN 80-7196-180-9.
- [7] SMĚKAL, Zdeněk, Analýza signálů a soustav – BASS. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [8] Slyšení: Přednáška č.5 [online]. Neznámé: Neznámé Dostupné z URL: <[http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/prednasky/files/5\\_Slyseni.pdf](http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/prednasky/files/5_Slyseni.pdf)>
- [9] KLIMEŠ, Martin: Analýza vlivu jednotlivých harmonických složek nebo formantových oblastí na vjem barvy zvuku. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [10] RYNDOVÁ, R.: Otázka historických ladění při současné interpretační praxi hry na zobcové flétny.[online].Brno, 2009.[cit.2015-12-15]. Dostupné z URL: <<http://theses.cz/id/9qdd2f/>>. Bakalářská práce. Filozofická fakulta Masarykovi university, Katedra hudební vědy. Vedoucí práce: MgA. Eduard Tomašík
- [11] ČSN 01 1600: Akustika – Terminologie.



- [12] LETOWSKI, T.: Timbre, tone color, and soundquality: concepts and definitions. Archivesofacoustic 17 (1992) Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/publication/288929521\\_Timbre\\_tone\\_color\\_and\\_sound\\_quality\\_Concepts\\_and\\_definitions](https://www.researchgate.net/publication/288929521_Timbre_tone_color_and_sound_quality_Concepts_and_definitions)>.
- [13] OBRÁZEK: Autor: NEZNÁMÍ, Dostupný z URL: <[https://cml.letuska.cz/sites/default/files/01\\_119\\_w1024.jpg](https://cml.letuska.cz/sites/default/files/01_119_w1024.jpg)>
- [14] Akustika hudebních nástrojů a lidského hlasu: Přednáška č.1, Zvukové vlny [online]. Neznámé: Neznámé, Dostupné z URL: <[http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/I\\_zvukove\\_vlny.pdf](http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/I_zvukove_vlny.pdf)>
- [15] Základy hudební akustiky: Přednáška č.8, Ladění [online]. Neznámé: Neznámé, Dostupné z URL: <[http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/downloads-2/files/8\\_Ladeni.pdf](http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/downloads-2/files/8_Ladeni.pdf)>
- [16] Základy hudební akustiky: Přednáška č.2, Kmity a vlny [online]. Neznámé: Neznámé, Dostupné z URL: <[http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/downloads-2/files/2\\_VUT\\_KmityAVlny.pdf](http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/downloads-2/files/2_VUT_KmityAVlny.pdf)>

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

$T$ .....	perioda.....	[s]
$f$ .....	funkce.....	[-]
$A$ .....	amplituda.....	[-]
$t$ .....	čas .....	[s]
$\omega$ .....	úhlový kmitočet .....	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi$ .....	fázový posun.....	[-]
$n$ .....	celé číslo .....	[-]
$k$ .....	pořadové číslo vyšší harmonické složky.....	[-]
$C_k$ .....	modul .....	[-]
$dB$ .....	decibel .....	[-]
$f$ .....	frekvence .....	[Hz]

# SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha 1-**Dotazník formou webových stránek je přístupný na adrese:

<[www.analyzavysek.9e.cz](http://www.analyzavysek.9e.cz)> .....55

**Příloha 2-**Zvukové vzorky, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>> .....55

**Příloha 3-**Tabulky výsledků a vyhodnocení, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>> .....55

**Příloha 4-**Zdrojový kód internetového dotazníku, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>> .....55

Na základě protiepidemiologických opatření a nařízení nejsou přílohy odevzdávány na fyzickém nosiči (např. CD), ale je využito internetového úložiště s neomezeným přístupem.

# PŘÍLOHY

**Příloha 1**-Dotazník formou webových stránek je přístupný na adrese:

<[www.analyzavysek.9e.cz](http://www.analyzavysek.9e.cz)>

**Příloha 2**-Zvukové vzorky, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>>

**Příloha 3**-Tabulky výsledků a vyhodnocení, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>>

**Příloha 4**-Zdrojový kód internetového dotazníku, dostupné na webovém úložišti na adrese:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1RnL0ao3n96vZzIK00BZXLE8svfWSTz-X?usp=sharing>>